

**Universidade Nova de Lisboa**  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil

**Influência da rugosidade dos leitos de cheia em  
escoamentos em canais de secção composta**

Pedro Miguel Guerreiro da Conceição Massa

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências  
e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil –  
– Perfil de Construção

Orientador: Professor João Gouveia Bento Leal

**2011**



## **Agradecimentos**

Além de agradecer à instituição LNEC enquanto entidade, queria agradecer ao Eng. João Rocha pela aprovação e colaboração e pela oportunidade que me deu de desenvolver esta dissertação. Gostaria também de agradecer de forma muito sincera:

Ao Professor João Leal pela sua orientação, apoio e disponibilidade constante, pela motivação e sobretudo amizade, durante todo o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço-lhe também por me ter proporcionado a oportunidade de trabalhar num projecto no seio da comunidade científica.

Ao Eng. João Fernandes, colega e amigo, pelo apoio e conselhos práticos. A sua ajuda foi fulcral na elaboração desta dissertação.

A toda a equipa que trabalha no Pavilhão do LNEC onde foram realizados os ensaios laboratoriais, que durante estes meses ajudaram na colocação dos materiais necessários ao decorrer da experiência bem como nos arranjos nos equipamentos.

Aos meus familiares, à minha namorada e aos meus amigos pelo apoio, optimismo e por estarem sempre presentes.



## Resumo

O escoamento de um rio ao esgotar a sua capacidade de vazão em situação de cheia transborda do seu leito principal e estende-se aos denominados leitos de cheia, impondo ao rio uma configuração de secção composta. No leito principal, com maior profundidade, o escoamento atinge velocidades superiores comparativamente às que se verificam nos leitos de cheia. A influência das diferenças de velocidades e rugosidades entre os leitos condiciona o desenvolvimento do escoamento devido à interacção do escoamento no leito principal com o escoamento no(s) leito(s) de cheia, provocando transferências de massa e quantidade de movimento.

Na presente dissertação são apresentados e analisados os resultados obtidos em ensaios experimentais realizados num canal de secção composta em regime uniforme. Foram medidas as alturas de água, velocidades longitudinais e tensões de arrastamento, parâmetros estudados para diferentes alturas relativas de escoamento com leitos de cheia em fundo liso e leitos de cheia em fundo rugoso, este último simulando a vegetação natural dos rios com a rugosidade dada por panos de relva sintética. Comparam-se os fenómenos ocorridos para as mesmas alturas de água no canal, em leitos de cheia com fundo liso e fundo rugoso.

Com a passagem de leitos de cheia lisos para leitos de cheia rugosos verificou-se uma diminuição da capacidade de vazão do canal e um aumento da transferência de quantidade de movimento entre o leito principal e os leitos de cheia. O desenvolvimento da camada de mistura é condicionado pela altura relativa, mas ainda mais pela rugosidade nos leitos de cheia, cuja turbulência gerada junto ao fundo limita o desenvolvimento da camada de mistura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Canal de secção composta; Escoamento uniforme; Leitos de cheia rugosos.

### **Abstract**

When a river flow reaches the main channel bankfull depth, the water overflows and inundates the floodplains. The flow in the main deeper channel reaches higher velocity compared to the floodplains. Because velocity and roughness of the main channel and floodplains are often different, the flow structure of a compound channel is usually very complex, causing mass and momentum transfer.

This study aims to present and analyse the results of a set of experimental measurements in a compound channel with uniform flow. Three parameters were taken into account for different relative flow depths: water depth, longitudinal velocity and bed shear stress. These parameters were studied in smooth and rough floodplains. The roughness simulating natural river vegetation was given by synthetic grass. The measured results at the same depth were compared for the smooth and rough floodplains.

From smooth to rough floodplains, discharge capacity decreased and momentum transfer increased between the main channel and floodplains. The development of the mixing/shear layer is influenced by the relative depth, but even more by the floodplain roughness. The bottom turbulence generated in the rough floodplains bounds the mixing/shear layer development.

**KEYWORDS:** Compound Channel; Uniform flow; Rough floodplains.

### Simbologia

Símbolo	Significado
$A$	constante aditiva da lei logaritmica
$b$	largura do leito principal
$B$	largura da secção total do canal
$C$	coeficiente de Chézy
$C_{f_a}$	coeficiente de fricção
$D$	altura de água no leito principal
$D_m$	média das alturas $H$ e $h$
$f$	coeficiente de Weisbach
$g$	aceleração gravítica
$h$	altura de água nos leitos de cheia, profundidade do canal
$H$	altura de água, altura de água no leito principal, energia total
$h_r$	altura relativa
$J$	perda de carga unitária
$k_s$	rugosidade absoluta ou altura das rugosidades da fronteira fixa
$K_s$	coeficiente de rugosidade de Strickler
$l$	comprimento característico
$n$	coeficiente de Manning
$p$	pressão
$P$	perímetro molhado
$Q$	caudal escoado
$Q_0$	caudal de cálculo
$R$	raio hidráulico
$Re$	número de Reynolds
$S$	secção de escoamento
$S_0$	declive do canal
$S_f$	inclinação da linha de energia
$t$	tempo
$u$	componente da velocidade de escoamento
$\bar{u}$	velocidade média de escoamento
$u'$	componente de flutuação da velocidade de escoamento

$u_*$	velocidade de atrito junto ao fundo
$U^+$	componente da velocidade no sentido do escoamento adimensionalizada
$U_p$	velocidade média em profundidade
$v$	componente da velocidade de escoamento na direcção transversal ao escoamento
$V$	diferença de potencial eléctrico
$W$	peso genérico
$X$	posição longitudinal no canal
$Y$	posição transversal no canal
$Z$	posição transversal no canal
$z$	cota geométrica
$z^+$	cota geométrica adimensionalizada
$\gamma$	peso volúmico
$\delta$	comprimento da camada de mistura
$\delta s$	comprimento genérico do canal
$\delta'$	espessura da subcamada viscosa
$\delta t$	intervalo de tempo
$\theta$	ângulo genérico
$\nu$	coeficiente de viscosidade cinemática
$\rho$	massa volúmica
$\kappa$	constante universal de Von Kármán
$\mu$	viscosidade dinâmica
$\tau$	tensão tangencial
$\tau_a$	tensão aparente na interface
$\tau_0$	tensão de arrastamento
$\tau_l$	tensão tangencial devida à viscosidade cinemática
$\tau_t$	tensão tangencial aparente devida às flutuações turbulentas da velocidade
$\tau_{xy}$	tensão de Reynolds
$\Delta_p$	variação da pressão
$\Delta S$	variação da área da secção



### **Acrónimos**

Índice	Significado
med	valor médio
FCF	Flood Channel Facility
J	Jusante
LC	Leito de Cheia
LP	Leito Principal
M	Montante
Tot	Secção total
X	valor na posição X do canal
WDCM	Método de divisão do canal



## ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Estrutura da dissertação .....	4
2. Revisão bibliográfica .....	5
2.1. Conceitos básicos / teóricos.....	5
2.1.1. Desenvolvimento da camada limite.....	6
2.1.2. Perfil vertical de velocidades.....	7
2.1.3. Distribuição das velocidades médias em profundidade.....	9
2.1.4. Distribuição das tensões tangenciais em escoamentos uniformes.....	11
2.1.5. Estrutura Turbulenta .....	14
2.2. Estudos experimentais em canais de secção composta .....	15
2.2.1. Tensão aparente na interface .....	18
2.2.2. Distribuição da viscosidade efectiva .....	19
2.2.3. Escoamento em canal de secção composta com leito liso.....	20
2.2.4. Escoamento em canal de secção composta com leito rugoso .....	24
3. Procedimento e instalação experimental.....	29
3.1. Canal de secção composta .....	30
3.2. Equipamentos de medição e controlo .....	34
3.2.1. Hidrómetros .....	34
3.2.2. Caudalímetros .....	35

3.2.3. Tubo de Pitot .....	36
3.3. Cálculo das tensões de arrastamento .....	41
3.3.1. Tensões de arrastamento em fundo liso .....	41
3.3.2. Tensões de arrastamento em fundo rugoso.....	42
3.4. Procedimento experimental.....	47
3.4.1. Considerações iniciais .....	47
3.4.2. Obtenção do regime uniforme.....	50
3.4.3. Ensaio realizados.....	51
4. Resultados obtidos.....	55
4.1. Caracterização da rugosidade .....	55
4.1.1. Considerações iniciais .....	55
4.1.2. Cimento alisado .....	56
4.1.3. Relva artificial .....	59
4.2. Regime uniforme com leitos de cheia lisos – $h_r=0,15$ e $h_r=0,3$ .....	62
4.3. Regime uniforme com leitos de cheia rugosos – $h_r=0,15$ e $h_r=0,3$ .....	73
4.4. Determinação da largura da camada de mistura.....	89
4.5. Determinação da viscosidade efectiva .....	95
4.6. Determinação da tensão aparente na interface.....	100
5. Conclusões .....	103
6. Bibliografia .....	105
Anexos .....	109

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Correspondência entre Caudal de Referência $Q_0$ (l/s) e Caudal de Leitura $Q$ (l/s) para leito principal.....	36
Quadro 2 – Correspondência entre Caudal de Referência $Q_0$ (l/s) e Caudal de Leitura $Q$ (l/s) para leitos de cheia.....	36
Quadro 3 – Características Técnicas Tubo de Pitot utilizado.....	38
Quadro 4 – Cálculo das Tensões de arrastamento dadas por Wu e Rajaratman (2000) .....	45
Quadro 5 – Tensões de arrastamento dadas por Wu e Rajaratman (2000) para $a$ e $b$ determinados a partir dos valores de $R_s$ determinados .....	46
Quadro 6 – Erro da medição experimental de velocidades.....	46
Quadro 7 – Quadro resumo de Ensaio realizados .....	54
Quadro 8 – Valores de $K_s$ e $k_s$ relativos aos diferentes caudais impostos em fundo liso .....	58
Quadro 9 – Valores de $K_s$ e $k_s$ relativos aos diferentes caudais impostos em fundo com relva sintética .....	61
Quadro 10 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo liso .....	62
Quadro 11 – Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo liso com $h_r=0,15$ .....	62
Quadro 12 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme – $h_r=0,30$ em fundo liso .....	68
Quadro 13 - Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo liso com $h_r=0,30$ .....	68
Quadro 14 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo rugoso .....	74
Quadro 15 - Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo rugoso com $h_r=0,15$ .....	74
Quadro 16 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme – $h_r=0,30$ em fundo rugoso .....	79
Quadro 17 - Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo rugoso com $h_r=0,30$ .....	79
Quadro 18 – Valores determinados para a largura da camada de mistura – metodologia de Pope (2000).....	90

Quadro 19 – Valores determinados para a largura da camada de mistura – metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	90
Quadro 20 – Valores determinados para a largura da camada de mistura – metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	91
Quadro 21 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de $v_t$ - $h_r=0,15$ Liso .....	139
Quadro 22 – Distribuição transversal de $v_b$ , $v'_t$ e $v''_t$ - $h_r=0,15$ Liso .....	140
Quadro 23 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de $v_t$ - $h_r=0,30$ Liso .....	141
Quadro 24 – Distribuição transversal de $v_b$ , $v'_t$ e $v''_t$ - $h_r=0,30$ Liso .....	142
Quadro 25 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de $v_t$ - $h_r=0,15$ Rugoso .....	143
Quadro 26 – Distribuição transversal de $v_b$ , $v'_t$ e $v''_t$ - $h_r=0,15$ Rugoso .....	144
Quadro 27 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de $v_t$ - $h_r=0,30$ Rugoso .....	145
Quadro 28 – Distribuição transversal de $v_b$ , $v'_t$ e $v''_t$ - $h_r=0,30$ Rugoso .....	146
Quadro 29 – Cálculo da tensão aparente – Leitos de cheia lisos X7500 .....	147
Quadro 30 – Cálculo da tensão aparente – Leitos de cheia Rugosos X7500 .....	148

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Cheia no Rio Mondego, Montemor Janeiro 1962 ( <a href="http://www.uc.pt">www.uc.pt</a> ) .....	1
Figura 2 – Exemplo de mapa de inundação .....	2
Figura 3 – Configuração transversal característica de um rio .....	3
Figura 4 – Distribuição de velocidade em canais de secção simples (Adaptada de Graf e Altinakar, 1998).....	5
Figura 5 – Desenvolvimento da camada limite sobre uma superfície sólida (Adaptada de Massey, 2002) .....	6
Figura 6 – Perfil esquemático de velocidades num canal de escoamento aberto em 2D (Adaptada de Yen, 2002) .....	7
Figura 7 – Desenvolvimento da camada de mistura .....	9
Figura 8 – Esquema utilizado para a determinação da largura da camada de mistura (Prooijen <i>et al.</i> , 2005).....	11
Figura 9 – Esquema de forças actuantes num elemento de fluído (Adaptada de Cardoso, 1998) .....	12
Figura 10 – Variações das tensões tangenciais com a distância ao fundo (Adaptada de Cardoso, 1998) .....	14
Figura 11 – Séries temporais de velocidade longitudinal $u$ e transversal $v$ (Adaptada de Shiono e Knight, 1991) .....	15
Figura 12 – Representação esquemática de um vórtice de eixo vertical na interface (Adaptada de Prooijen <i>et al.</i> , 2005).....	16
Figura 13 – Estrutura turbulenta de um canal em secção Composta (Adaptada de Shiono e Knight, 1991) .....	17
Figura 14 – Vórtices Horizontais – Localização para $h_r < 0,375$ a) e $h_r > 0,375$ b) (Adaptada de Nezu <i>et al.</i> , 1999).....	18
Figura 15 – Tensão aparente na interface entre o leito principal e o leito de cheia (adaptada de Knight e Demetriou, 1983) .....	22
Figura 16 - Comparação de tensões de arrastamento em LC – $H=0,3m$ (adaptada de Rameshwaran e Naden, 2003) .....	23
Figura 17 – Velocidades longitudinais em fundo liso a) e fundo rugoso b) (Adaptada de Yang <i>et al.</i> , 2007).....	25
Figura 18 - Perfis de velocidade (Adaptada de Yang <i>et al.</i> , 2007) .....	25

Figura 19 – Variação temporal das componentes de flutuação da velocidade da velocidade $u$ e $v$ (Adaptado de Yang <i>et al.</i> , 2007).....	26
Figura 20 – Comparação entre $SKM$ e ADV, com LC liso a) e LC rugoso b) (Adaptada de Sanjou <i>et al.</i> 2010).....	27
Figura 21 – Canal Veiga da Cunha – LNEC .....	29
Figura 22 – Dimensões da Secção do canal .....	30
Figura 23 – Sistema de bombagem do reservatório subterrâneo para o reservatório elevado .....	30
Figura 24 – Indicação das posições dos sistemas adaptados ao canal .....	31
Figura 25 – Sistema de estabilização do escoamento .....	32
Figura 26 – Posição dos eixos das coordenadas espaciais no canal.....	33
Figura 27 – Comportas a jusante do canal – Regulação da comporta de leito principal .....	33
Figura 28 – Hidrómetro a jusante ligado ao fundo do canal.....	34
Figura 29 – Caudalímetros instalados na estação experimental.....	35
Figura 30 – Esquema de funcionamento do tubo de Pitot .....	37
Figura 31 – Tubo de Pitot (adaptado de Massey, 2002) .....	37
Figura 32 – Tubo de Pitot utilizado .....	38
Figura 33 – Transdutor diferencial de pressões.....	39
Figura 34 – Hidrómetro instalado num reservatório .....	39
Figura 35 – Exemplo de Curva de Calibração do Tubo de Pitot .....	41
Figura 36 – Velocidades determinadas experimentalmente na fronteira rugosa .....	43
Figura 37 – Esquematisação das secções do canal estudadas.....	47
Figura 38 – Comparação do perfil de velocidades medido a 40% da altura de escoamento e o perfil de velocidades médias – $h_r=0,15$ em fundo liso .....	49
Figura 39 – Esquematisação da integração realizada para cálculo de caudal escoado em determinada.....	50
Figura 40 – Procedimento de Calibração do canal para Regime Uniforme (Teixeira, 2011) ..	51
Figura 41 – Fundo sem rugosidade .....	52
Figura 42 – Fundo com rugosidade apenas no leito principal .....	52
Figura 43 – Fundo com rugosidade apenas nos leitos de cheia .....	53
Figura 44 – Curvas de Vazão – Fundos Liso, Relva no Leito Principal.....	59
Figura 45 – Alteração da área de escoamento com a colocação da relva sintética no leito principal .....	60
Figura 46 – Evolução longitudinal do rácio $Q_{lc}/Q - h_r=0,15$ em fundo liso (%) .....	63



Figura 47 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade - $h_r=0,15$ em fundo liso .....	64
Figura 48 – Perfis vertical velocidades - $h_r=0,15$ em fundo liso.....	65
Figura 49 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000 $h_r=0,15$ em fundo liso .....	66
Figura 50 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000 $h_r=0,15$ em fundo liso .....	66
Figura 51 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500 $h_r=0,15$ em fundo liso .....	66
Figura 52 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 – $h_r=0,15$ em fundo liso .....	67
Figura 53 – Evolução longitudinal do rácio $Q_{ic}/Q$ - $h_r=0,30$ em fundo liso (%).....	68
Figura 54 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade - $h_r=0,30$ em fundo liso .....	69
Figura 55 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000 $h_r=0,30$ em fundo liso	70
Figura 56 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000 $h_r=0,30$ em fundo liso	70
Figura 57 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500 $h_r=0,30$ em fundo liso	70
Figura 58 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 – $h_r=0,30$ em fundo liso .....	71
Figura 59 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade – comparação para X 7500 entre $h_r=0,15$ e $h_r=0,30$ em fundo liso .....	72
Figura 60 – Perfis Distribuição transversal das tensões de arrastamento em fundo liso – comparação para X 7500 entre $h_r=0,15$ e $h_r=0,30$ .....	73
Figura 61 – Evolução longitudinal do rácio $Q_{ic}/Q$ - $h_r=0,15$ em fundo rugoso (%) .....	74
Figura 62 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade - $h_r=0,15$ em fundo rugoso.....	75
Figura 63 – Perfis verticais de velocidades - $h_r=0,15$ em fundo rugoso .....	76
Figura 64 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000 $h_r=0,15$ em fundo rugoso.....	77
Figura 65 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000 $h_r=0,15$ em fundo rugoso.....	77
Figura 66 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500 $h_r=0,15$ em fundo rugoso.....	77
Figura 67 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 – $h_r=0,15$ em fundo rugoso.....	78

Figura 68 – Evolução longitudinal do rácio $Q_{lc}/Q$ - $h_r=0,30$ em fundo rugoso (%) .....	79
Figura 69 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade - $h_r=0,30$ em fundo rugoso.....	80
Figura 70 – Perfis vertical velocidades - $h_r=0,30$ em fundo rugoso .....	81
Figura 71 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000 $h_r=0,30$ em fundo rugoso.....	81
Figura 72 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000 $h_r=0,30$ em fundo rugoso.....	82
Figura 73 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500 $h_r=0,30$ em fundo rugoso.....	82
Figura 74 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 – $h_r=0,30$ em fundo rugoso.....	83
Figura 75 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade – comparação para X 7500 entre $h_r=0,15$ e $h_r=0,30$ em fundo rugoso.....	84
Figura 76 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em X 7500 com $h_r=0,15$ – comparação entre fundo liso e fundo rugoso .....	85
Figura 77 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em X 7500 com $h_r=0,30$ – comparação entre fundo liso e fundo rugoso .....	86
Figura 78 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento em fundo Rugoso – comparação para X 7500 entre $h_r=0,15$ e $h_r=0,30$ .....	87
Figura 79 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento em X 7500 com $h_r=0,15$ – comparação entre fundo liso e fundo rugoso .....	87
Figura 80 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento em X 7500 com $h_r=0,30$ – comparação entre fundo liso e fundo rugoso .....	88
Figura 81 - Valores das tensões de arrastamento adimensionalizados por $\tau_0 / \gamma RS$ .....	89
Figura 82 - Evolução longitudinal da largura da camada de mistura para as margens esquerda e direita – metodologia de Pope (2000).....	91
Figura 83 - Evolução longitudinal da largura da camada de mistura para as margens esquerda e direita – metodologia de Prooijen e Uijttewaai (2002).....	92
Figura 84 – Evolução longitudinal da largura da camada de mistura para as margens esquerda e direita – metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005) .....	92
Figura 85 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para $h_r=0,15$ Liso .....	93
Figura 86 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para $h_r=0,30$ Liso .....	94

Figura 87 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para $h_r=0,15$ Rugoso.....	94
Figura 88 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para $h_r=0,30$ Rugoso.....	94
Figura 89 – Distribuição transversal de $v_t$ – $h_r=0,15$ Liso .....	96
Figura 90 – Distribuição transversal de $v_t$ – $h_r=0,30$ Liso .....	96
Figura 91 – Distribuição transversal de $v_t$ – $h_r=0,15$ Rugoso.....	97
Figura 92 – Distribuição transversal de $v_t$ – $h_r=0,30$ Rugoso.....	97
Figura 93 - Distribuição transversal de $v'_t$ e $v''_t$ em X 7500 – $h_r=0,15$ Liso .....	98
Figura 94 - Distribuição transversal de $v'_t$ e $v''_t$ em X 7500 – $h_r=0,30$ Liso .....	99
Figura 95 - Distribuição transversal de $v'_t$ e $v''_t$ em X 7500 – $h_r=0,15$ Rugoso .....	99
Figura 96 - Distribuição transversal de $v'_t$ e $v''_t$ em X 7500 – $h_r=0,30$ Rugoso .....	100
Figura 97 – Tensão aparente $\tau_a$ - Moreta e Martin-Vide (2010).....	101
Figura 98 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,15$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000) .....	109
Figura 99 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,15$ – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000) .....	109
Figura 100 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X3000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	110
Figura 101 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X5000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	110
Figura 102 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X7500 segundo metodologia de Pope (2000) .....	111
Figura 103 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,30$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000) .....	111
Figura 104 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,30$ – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000) .....	112
Figura 105 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X3000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	112
Figura 106 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X5000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	113
Figura 107 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X7500 segundo metodologia de Pope (2000) .....	113

Figura 108 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,15$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000) .....	114
Figura 109 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,15$ – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000).....	114
Figura 110 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X3000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	115
Figura 111 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X5000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	115
Figura 112 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X7500 segundo metodologia de Pope (2000) .....	116
Figura 113 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,30$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000) .....	116
Figura 114 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,30$ – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000).....	117
Figura 115 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X3000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	117
Figura 116 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X5000 segundo metodologia de Pope (2000) .....	118
Figura 117 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X7500 segundo metodologia de Pope (2000) .....	118
Figura 118 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,15$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	119
Figura 119 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,15$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	119
Figura 120 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	120
Figura 121 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	120
Figura 122 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	121
Figura 123 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,30$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	121
Figura 124 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,30$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	122

Figura 125 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	122
Figura 126 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	123
Figura 127 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	123
Figura 128 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,15$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002).....	124
Figura 129 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,15$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002).....	124
Figura 130 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	125
Figura 131 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	125
Figura 132 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	126
Figura 133 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,30$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002).....	126
Figura 134 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,30$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002).....	127
Figura 135 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	127
Figura 136 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	128
Figura 137 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002) .....	128
Figura 138 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,15$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	129
Figura 139 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,15$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	129
Figura 140 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	130
Figura 141 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	130

Figura 142 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,15$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	131
Figura 143 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,30$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	131
Figura 144 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos - $h_r=0,30$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	132
Figura 145 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	132
Figura 146 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	133
Figura 147 - Regime uniforme com Leitos Lisos – $h_r=0,30$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	133
Figura 148 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,15$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005) .....	134
Figura 149 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,15$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005) .....	134
Figura 150 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	135
Figura 151 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	135
Figura 152 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,15$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	136
Figura 153 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,30$ – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005) .....	136
Figura 154 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos - $h_r=0,30$ – Leito direito segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005) .....	137
Figura 155 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X3000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	137
Figura 156 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X5000 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	138
Figura 157 - Regime uniforme com Leitos Rugosos – $h_r=0,30$ em X7500 segundo metodologia de Prooijen <i>et al.</i> (2005).....	138
Figura 158 - Inserção de corante no LC – $h_r=0,20$ com LC lisos.....	149
Figura 159 - Inserção de corante na interface – $h_r=0,20$ com LC lisos.....	149
Figura 160 - Inserção de corante na interface – $h_r=0,30$ com LC lisos.....	150

Figura 161 - Inserção de corante no LC – $h_r=0,30$ com LC lisos.....	150
Figura 162 - Inserção de corante na interface – $h_r=0,15$ com LC Rugosos.....	151
Figura 163 - Inserção de corante no LC – $h_r=0,15$ com LC Rugosos.....	151
Figura 164 - Inserção de corante na interface – $h_r=0,30$ com LC Rugosos.....	152
Figura 165 - Inserção de corante no LC – $h_r=0,30$ com LC Rugosos.....	152





## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde há muitos séculos que as populações tendem a instalar-se em planícies aluviais, não só pelas suas disponibilidades hídricas, mas também pelo alargamento da rede de transportes por via marítima, com a consequente melhoria de qualidade de vida das populações (Blanchon *et al.*, 1996).

No entanto, a acção do homem nem sempre propiciou um ambiente saudável entre a natureza e a população, não só pelas suas próprias acções como por fenómenos naturais, muitas vezes de difícil previsão temporal e dimensão, pondo em risco vidas humanas e bens materiais (Allen *et al.*, 1978). É portanto fundamental compreender o funcionamento dos fenómenos naturais associados a riscos climático-meteorológicos e hidrológicos com vista à prevenção de catástrofes como é o caso das cheias em rios, das quais há ocorrências registadas por toda a história (Sebastiaan e Kelman, 2005).

O presente estudo incide sobre os fenómenos ocorridos durante eventos de cheias em rios, na sua grande maioria provocados por fortes precipitações. Essa ocorrência pode originar o transbordo do escoamento do leito natural ou principal para os seus leitos de cheia (*cf.* Figura 1).

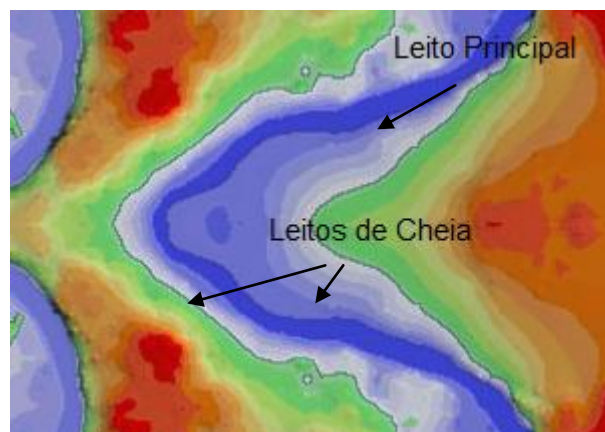


**Figura 1 – Exemplo de Cheia no Rio Mondego, Montemor Janeiro 1962 ([www.uc.pt](http://www.uc.pt))**

Com vista à caracterização dos níveis e riscos associados à inundação dos leitos de cheia dos rios, têm vindo a ser desenvolvidos estudos que permitem a elaboração de mapas de inundação (*cf.* Figura 2). A precisão destes métodos é afectada pelo desconhecimento da interacção dos escoamentos do leito principal com os leitos de cheia.

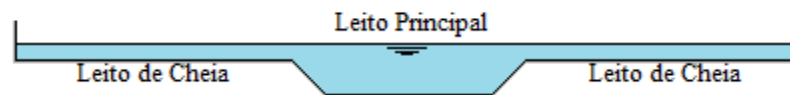
Neste âmbito, foi aprovada a Directiva 2007/60/CE a 23 de Outubro de 2007 do Parlamento Europeu com vista ao estabelecimento de um quadro de avaliação e gestão de riscos associados a inundações, identificando zonas afectadas a estas e criando cartas de zonas inundáveis, reexaminadas e actualizadas se necessário, por períodos de seis anos. Do mesmo modo também os planos de gestão de riscos de inundação deverão ser reexaminados periodicamente e actualizados conforme as alterações que forem sofrendo ao longo dos tempos, melhorando continuamente o plano de acções de apoio às populações em caso de inundações.

O conhecimento dos mapas de inundação pode ainda ser útil a instituições que actuem na área do ordenamento do território, evitando que como no passado, sejam criadas infra-estruturas em locais de risco.



**Figura 2 – Exemplo de mapa de inundação**

As situações de cheia nos rios podem provocar uma subida do nível de água a um nível tal que o caudal afluente esgote a capacidade de vazão do leito principal, passando parte do escoamento para os terrenos adjacentes a este. De uma forma geral, pode dizer-se que o troço de jusante dos rios apresenta uma secção transversal composta pelo leito principal (LP) ladeado por um ou dois leitos de cheia (LC) (*cf.* Figura 3).



**Figura 3 – Configuração transversal característica de um rio**

A capacidade de vazão de rios calculada apenas com base em métodos unidimensionais que não entrem em linha de conta com a interação entre o escoamento nos leitos principal e de cheias afasta os valores obtidos dos valores reais, uma vez que não são tidas em conta as transferências de massa e quantidade de movimento entre as subsecções do rio com maior velocidade (LP) e aqueles onde o escoamento se processa mais lentamente (LC). Outro factor que contribui para o afastamento dos valores reais de várias estimativas reside na caracterização dos leitos de cheia, a influência que podem provocar no escoamento devido às destabilizações que neste provocam, seja por obstáculos existentes ou pela própria rugosidade que o constitui.

A relevância do tema da presente dissertação está assim relacionada com a necessidade de determinar as características de escoamento em rios e ribeiras cujos leitos de cheia se encontrem ocupados por vegetação. Deste modo, propõem-se os seguintes objectivos práticos:

- Verificação do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme para leitos lisos, com determinada altura de água escoada, correspondendo à situação padrão;
- Caracterização da rugosidade imposta aos leitos de cheia através dos panos de relva sintética;
- Verificação do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme para leitos de cheia rugosos, com determinada altura de água escoada;
- Caracterização do comportamento do escoamento em regime uniforme para leitos de cheia rugosos, em função da variação da altura de água.

Importa referir que o trabalho desenvolvido nesta dissertação está enquadrado nos seguintes programas de trabalhos de investigação financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia:

- “Escoamentos pouco profundos: influência das transferências de massa devidas à difusão turbulenta” Cooperação Portugal/França Programa Pessoa 2009-2010 Proc. 441.00 França.
- “Medição e Modelação da Turbulência em Escoamentos em Canais com Secção Composta” PTDC/ECM/70652/2006.
- “Modelação experimental e matemática do escoamento em canais de secção composta” Bolsa de Doutoramento SFRH/BC/37839/2007.

## **1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

No presente capítulo, apresenta-se o âmbito, os objectivos e necessidade de estudar e investigar o tema do escoamento em canais de secção composta, nomeadamente quando há diferentes rugosidades nos leitos principal e de cheias.

Assim sendo, surge a necessidade de expor, no segundo capítulo, a fundamentação teórica que envolve os fenómenos ligados a escoamentos em canais de secção composta presentes nesta dissertação, estudos e conclusões de outros autores bem como os recursos teóricos utilizados na interpretação e análise dos resultados obtidos experimentalmente.

No terceiro capítulo é feita a descrição detalhada da instalação experimental e dos equipamentos de medição e controlo que foram utilizados no decorrer dos ensaios realizados, bem como do procedimento experimental para obtenção do regime uniforme, base necessária para elaboração dos diferentes ensaios pretendidos.

No quarto capítulo são tratados, analisados e discutidos os dados recolhidos no decorrer dos ensaios experimentais, comparando-os a outros já realizados.

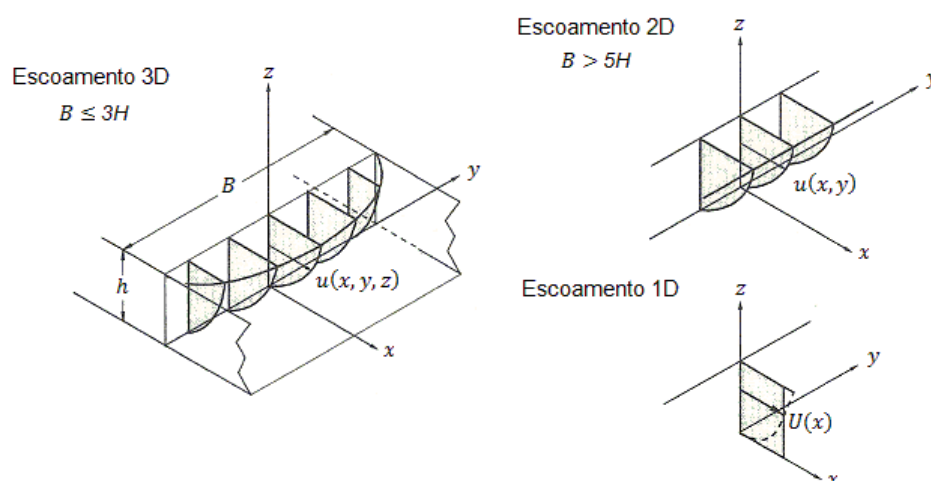
Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões mais relevantes que se retiraram do trabalho realizado e são indicados possíveis rumos para o desenvolvimento da investigação a realizar.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONCEITOS BÁSICOS / TEÓRICOS

Um escoamento diz-se uniforme quando a velocidade  $u$  do escoamento não varia em grandeza, direcção ou sentido, entre secções do canal considerado. Deste modo também a altura de água  $H$  permanece inalterada ao longo de todo o canal, sendo a superfície livre do líquido paralela ao fundo do canal (Massey, 2002). Um escoamento uniforme é um caso particular de um escoamento permanente ou estacionário, regime que mantém constantes ao longo do tempo os mesmos parâmetros de altura de água  $H$ , velocidade  $u$  e caudal  $Q$  (Chow, 1959).

Em canais de secção simples, a sua dimensão determina o modo como são estudados. Os escoamentos uniformes dependem geralmente de três variáveis,  $x$ ,  $y$  e  $z$ , podendo designar-se por tridimensionais. Para um canal rectangular com fundo e paredes laterais verticais, o tipo de escoamento e a distribuição esquemática de velocidades,  $u(x,y,z)$  é dado conforme a Figura 4. Quando os mesmos canais apresentam uma largura grande quando comparada com a profundidade,  $B > 5H$  o escoamento é considerado bidimensional, sendo  $H$  a profundidade e  $B$  a largura da secção total do canal, excepto numa pequena distância junto às paredes laterais. Para relações de  $B < 3H$  o escoamento é considerado tridimensional. Em escoamento uniforme podem simplificarmente ser considerados escoamentos unidimensionais em cálculos hidráulicos (Graf e Altinakar, 1998).

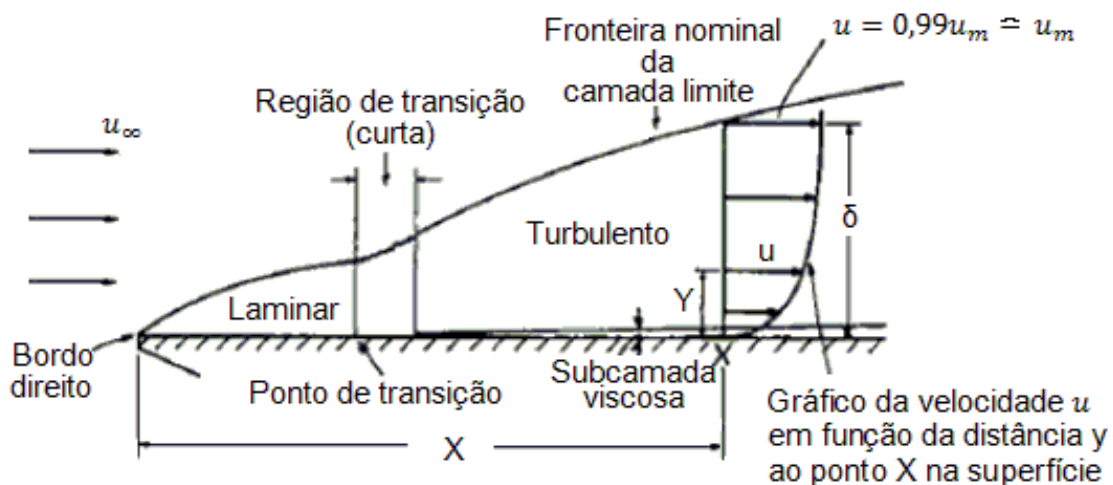


**Figura 4 – Distribuição de velocidade em canais de secção simples (Adaptada de Graf e Altinakar, 1998)**

As condições de escoamento variam caso o fundo seja rugoso, liso ou de transição. Consideram-se leitos lisos os que obedecem à condição  $k_s u_* / \nu < 5$ , considerando-se leitos rugosos os que obedecem à condição  $k_s u_* / \nu > 70$  (Graf e Altinakar, 1998), sendo  $u_*$  a velocidade de atrito junto ao fundo,  $k_s$  a rugosidade absoluta de Nikuradse e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido.

### 2.1.1. Desenvolvimento da camada limite

Num escoamento paralelo a uma superfície sólida denomina-se por camada limite a região situada junto à superfície sólida onde ocorre um rápido crescimento da velocidade do fluido desde zero até ao valor na corrente principal, representada vulgarmente como na Figura 5. Este crescimento é fruto de duas características fundamentais de escoamento de líquidos sendo uma o facto de não haver descontinuidade na velocidade, e a outra o simples facto de em relação à superfície, o valor da velocidade do fluido tomar sempre o valor zero na superfície sólida (Massey, 2002) independentemente da sua rugosidade.



**Figura 5 – Desenvolvimento da camada limite sobre uma superfície sólida (Adaptada de Massey, 2002)**

Torna-se notório o elevado gradiente de velocidade no interior da camada, isto é, o aumento da velocidade com o aumento da distância à superfície sólida, o que demonstra a existência de movimento relativo entre as partículas de fluido no interior da camada limite de

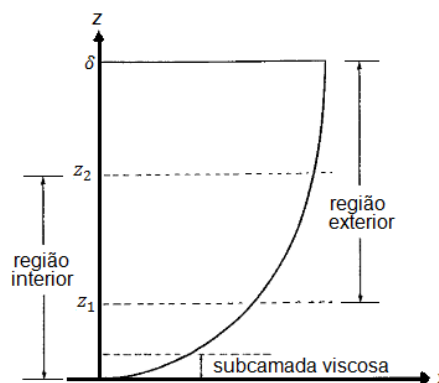
espessura  $\delta$  muito pequena quando comparada com  $X$ . Fora da camada limite o gradiente de velocidade é pequeno e o efeito da viscosidade torna-se desprezável.

Aos elevados gradientes de velocidade no interior da camada limite, estão associadas elevadas tensões de corte que provocam o retardamento das velocidades do fluído enquanto este escoar junto à superfície sólida. Com o aumento da espessura  $\delta$  da camada limite aumenta também a extensão de fluído retardado, e o regime laminar escoado até este ponto começa a sofrer perturbações que dão origem à sua passagem para regime turbulento, onde a camada limite cresce acentuadamente e a jusante da qual apresenta um crescimento linear contínuo.

### 2.1.2. Perfil vertical de velocidades

Num canal simples, o perfil de velocidades do escoamento de um fluído apresenta um crescimento rápido desde o seu valor zero junto ao fundo do canal até ao seu valor máximo encontrado imediatamente antes da superfície livre. O perfil vertical de velocidades é aproximadamente logarítmico (Graf e Altinakar, 1998).

Este perfil característico é visível na Figura 6 onde se distinguem duas regiões, uma região interior ou de parede em  $z_1/H \leq 0,2$  e numa região exterior em  $z_2/H > 0,2$ .



**Figura 6 – Perfil esquemático de velocidades num canal de escoamento aberto em 2D  
(Adaptada de Yen, 2002)**

Existe ainda uma camada intermédia entre o limite superior da camada interior ( $z_1$ ) e o limite inferior da camada superior ( $z_2$ ) onde se podem aplicar ao escoamento leis de distribuição de velocidades adequadas a ambas as regiões. Por sua vez a camada interior

pode subdividir-se em 3 sub-regiões: a subcamada viscosa (onde se verifica um escoamento essencialmente laminar), a subcamada de transição e a subcamada turbulenta, sendo a espessura da subcamada viscosa ( $\delta'$ ) dada por (1) (Cardoso, 1998).

$$\delta' = \frac{11,6\nu}{u_*} \quad (1)$$

A velocidade de atrito junto ao fundo  $u_*$  pode ser calculada de diversas formas:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2)$$

$$u_* = \sqrt{gRS_0} \quad (3)$$

com  $\tau_0$  (Pa ou N/m<sup>2</sup>) a tensão de arrastamento,  $\rho$  a massa volúmica da água (1000 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  (m/s<sup>2</sup>) a aceleração gravítica e  $R$  (m) o raio hidráulico. Pode ainda ser determinada com base da lei logarítmica válida na região interior para escoamentos turbulentos

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + A \quad (4)$$

Com  $U^+ = u / u_*$  e  $z^+ = zu_* / \nu$ . A constante de von Kármán  $\kappa$  é igual a 0,41 e  $A$  é uma constante aditiva.

A expressão (4) válida para paredes lisas na região interior entre e  $z_1 / H \approx 0,2$  pode ser desenvolvida respeitando as propriedades do logaritmo, obtendo-se:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z) + \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{u_*}{\nu}\right) + u_* A \quad (5)$$

Conhecendo-se um conjunto de pares de valores  $z$  e  $u$  medidos experimentalmente pode aplicar-se uma regressão linear do tipo  $u = a \ln(z) + b$  obtendo-se:

$$a = \frac{u_*}{\kappa} \quad (6)$$

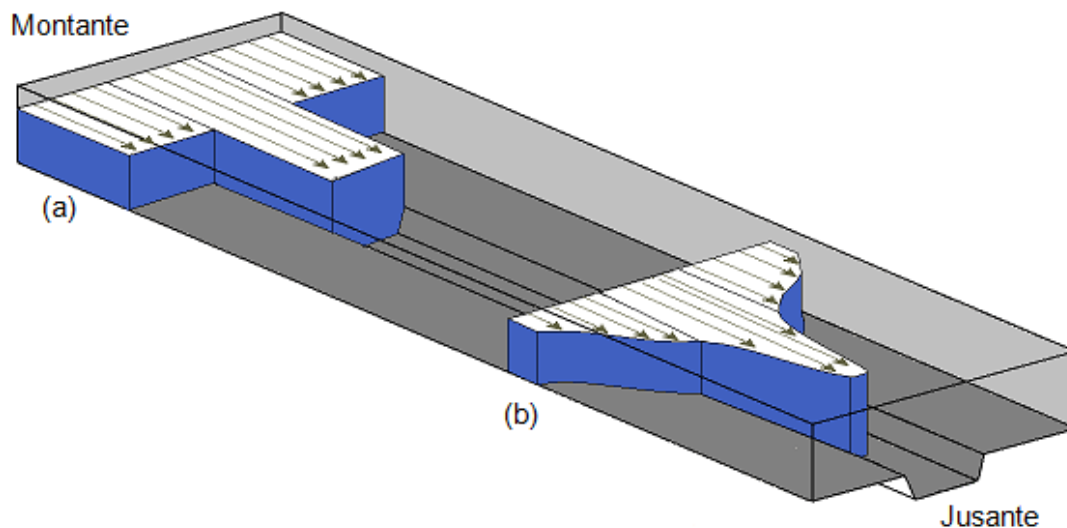
$$b = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{u_*}{\nu}\right) + u_* A \quad (7)$$



A partir do conhecimento dos valores de  $a$  e  $b$  podem ser obtidos os valores de  $u$ . e A. Nezu e Nakagawa (1993) verificam com base num conjunto vasto de medições que para leito liso a constante  $A$  tem o valor de 5,3.

### 2.1.3. Distribuição das velocidades médias em profundidade

Num canal de secção composta semelhante ao canal utilizado no trabalho experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação, as velocidades podem esquematizar-se conforme a Figura 7. Na posição (a), a montante do canal, representa-se a introdução diferencial e independente de caudais no leito principal e nos leitos de cheia. Na posição (b), secção mais a jusante, a redução da velocidade é visível junto às paredes laterais pelo efeito destas sobre o escoamento, tendendo as velocidades mais altas para uma uniformização. Verificam-se assim a jusante, no leito principal, onde a altura de escoamento é superior, velocidades mais altas e nos leitos de cheia velocidades mais baixas, sendo este efeito de montante para jusante denominado por desenvolvimento da camada de mistura.



**Figura 7 – Desenvolvimento da camada de mistura**

O cálculo da largura da camada de mistura  $\delta$  é sugerido de diversas maneiras por diferentes autores. Segundo Pope (2000), para uma camada de mistura plana e sem influência das paredes, a largura é dada por:

$$\delta_1 = (y_{90\%} - y_{10\%}) \quad (8)$$

em que  $y_{j\%}$  corresponde à posição transversal em que é atingida a velocidade  $U(j\%)$  dada por:

$$U(y_{j\%}) = U_{LC} + j(U_{LP} - U_{LC}) \quad (9)$$

A coordenada transversal  $y$  e a velocidade média em profundidade podem ser adimensionalizadas através das seguintes expressões:

$$\xi = \frac{y - \bar{y}(x)}{\delta(x)} \quad (10)$$

$$f(\xi) = \frac{(U - U_c)}{U_s} \quad (11)$$

em que  $\bar{y}$  é a coordenada média dada por:

$$\bar{y}(x) = \frac{1}{2} [y_{i\%}(x) + y_{j\%}(x)] \quad (12)$$

$U_c$  é a velocidade característica de convecção dada por:

$$U_c = \frac{1}{2} (U_{lp} + U_{lc}) \quad (13)$$

e  $U_s$  é a diferença de velocidades características

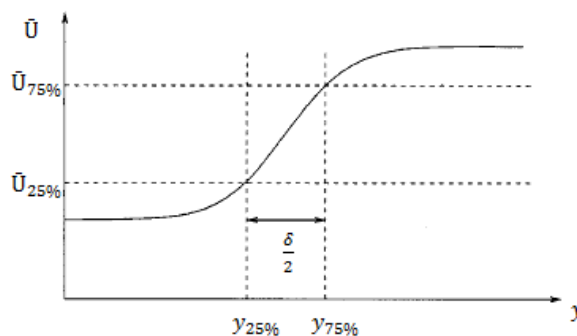
$$U_s = (U_{lp} - U_{lc}) \quad (14)$$

Análise semelhante é sugerida por Prooijen e Uijttewaal (2002) para escoamentos pouco profundos (i.e., com influência do leito) com leito horizontal. A largura da camada de mistura  $\delta$  é determinada por (15) com  $dU/dy_c$  a tangente à velocidade na posição correspondente a  $U_c$ .

$$\delta_2 = \frac{U_s}{\frac{dU}{dy_c}} \quad (15)$$

Considerando uma camada de mistura num escoamento em leito composto, (i.e., fundo não horizontal) em que são consideradas as transferências de velocidade na interface do leito de cheia com o leito principal, Prooijen *et al.* (2005) sugeriu a determinação de  $\delta$  conforme a Figura 8 sendo esta determinada pela expressão (16).

$$\delta_3 = 2(y_{75\%} - y_{25\%}) \quad (16)$$



**Figura 8 – Esquema utilizado para a determinação da largura da camada de mistura (Prooijen *et al.*, 2005)**

#### 2.1.4. Distribuição das tensões tangenciais em escoamentos uniformes

O valor da tensão tangencial  $\tau$  na direcção do escoamento à profundidade  $z$  pode ser determinado por equilíbrio de forças que actuam num volume de controlo do escoamento (*cf.* Figura 9).

Considerando o volume  $ABCD$  de um elemento de fluido de espessura unitária, as forças a actuar no volume são as resultantes das pressões hidrostáticas e quantidades de movimento nas faces  $AB$  e  $CD$ , na face  $BC$  a resultante das tensões tangenciais e a componente do peso  $W_x$  do volume considerado na direcção do escoamento. Uma vez conhecido que num escoamento uniforme as resultantes das pressões hidrostáticas são iguais às que actuam em sentido contrário (anulando-se), e que a variação da quantidade de movimento entre as faces  $AB$  e  $CD$  é nula, conclui-se que a resultante das tensões

tangenciais deve ser igual à componente do peso na direcção do escoamento ( $W_x = W \sin\theta = WJ$ ) (Cardoso, 1998).

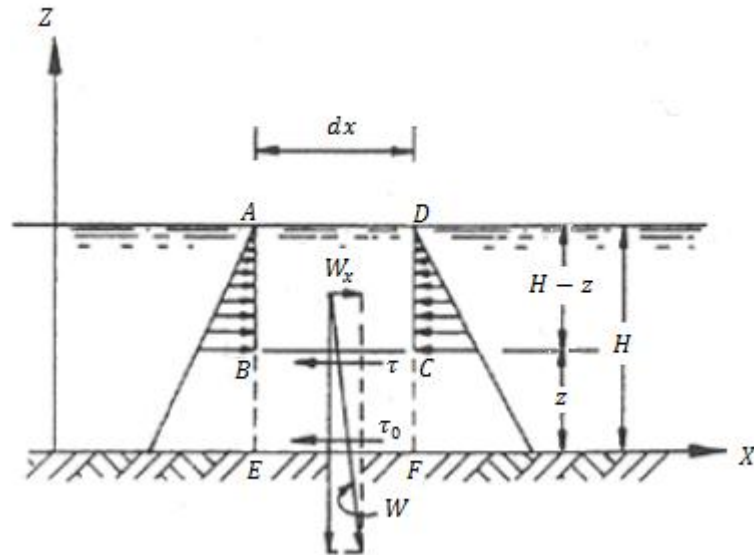


Figura 9 – Esquema de forças actuantes num elemento de fluído (Adaptada de Cardoso, 1998)

$$WJ - \tau dx = 0 \quad (17)$$

$$\tau = \gamma(H - z)J = \gamma hJ \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (18)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo que o fundo faz com a horizontal,  $J$  a perda de carga unitária,  $dx$  (m) uma distância genérica e  $\gamma$  o peso volúmico da água ( $9800 \text{ N/m}^3$ ).

Assim, pela expressão (18) verifica-se o aumento linear da tensão tangencial com a distância à superfície até ao seu valor máximo (19) junto ao fundo, anulando-se à superfície. A tensão tangencial junto ao fundo é frequentemente designada por tensão de arrastamento  $\tau_0$  (Cardoso, 1998) onde na sua expressão (19)  $H$  pode substituir-se pelo raio hidráulico  $R$  (m) para escoamentos tridimensionais e  $J$  pelo declive do canal  $S_0$  (m/m) para canais com inclinações pequenas.

$$\tau_0 = \gamma HJ \quad (19)$$

Em escoamentos uniformes e bidimensionais a tensão tangencial  $\tau$  num ponto à distância  $z$  do fundo resulta da soma da componente  $\tau_l$  tensão tangencial devida à viscosidade dinâmica  $\nu$ , com a componente  $\tau_t$  tensão tangencial devida às flutuações turbulentas da velocidade, também designada por tensão de Reynolds.

$$\tau = \tau_l + \tau_t = \mu \frac{du}{dz} + (-\rho \overline{u'v'}) \quad (20)$$

Sendo  $du/dz$  o gradiente de velocidade à distância  $z$  do fundo e  $\overline{u'v'}$  a média temporal do produto  $u'v'$ , componentes de flutuação da velocidade, nas direcções longitudinal e transversal do escoamento.

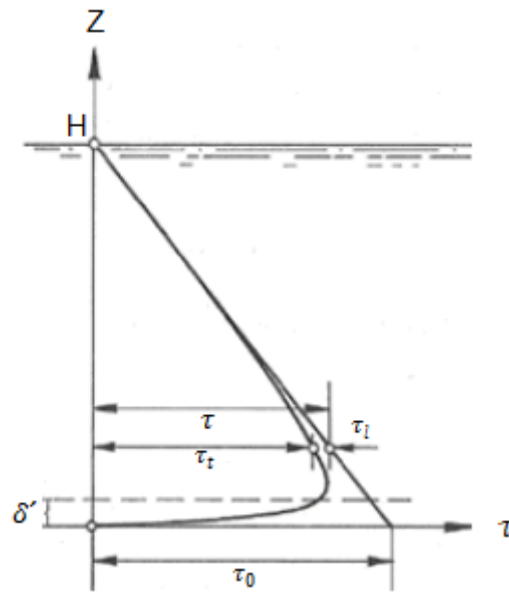
A componente  $\tau_t$  tensão tangencial devida à turbulência pode ainda ser aproximada em termos de velocidade pontual (Cardoso, 1998) por:

$$\tau_t = \rho l^2 \left( \frac{du}{dz} \right)^2 \quad (21)$$

sendo  $l$  o comprimento da mistura definido por Prandtl, calculado através de (22), expressão válida dada a proximidade das fronteiras sólidas.

$$l = \kappa z \quad (22)$$

Na Figura 10 apresentam-se esquematicamente para um escoamento turbulento em canal de superfície livre, as variações de  $\tau_l$  e  $\tau_t$  com a distância ao fundo. É possível verificar que para valores de  $z$  superiores à espessura da subcamada viscosa  $\delta'$ , a tensão tangencial total  $\tau$  é praticamente igual à tensão tangencial de origem turbulenta,  $\tau_t$ , sendo desprezável a componente  $\tau_l$ . Para valores de  $z$  inferiores a  $\delta'$  a tensão tangencial total é praticamente igual a  $\tau_l$ , sendo desprezável  $\tau_t$ .



**Figura 10 – Variações das tensões tangenciais com a distância ao fundo (Adaptada de Cardoso, 1998)**

Deste modo, o escoamento na região  $\delta' < z < H$  pode considerar-se praticamente independente da viscosidade, contrariamente à região  $k_s < z < \delta'$  onde prevalece o efeito da viscosidade. Assim a expressão (20) pode dividir-se na expressão analítica de um escoamento laminar (23) ou expressão para escoamentos turbulentos (24) totalmente desenvolvidos (Cardoso, 1998).

$$\tau = \tau_l = \mu \frac{du}{dz} \text{ com } \tau_t \text{ para } z < \delta' \quad (23)$$

$$\tau = \tau_t = \rho l^2 \left( \frac{du}{dz} \right)^2 \text{ com } \tau_l \text{ para } z > \delta' \quad (24)$$

### 2.1.5. Estrutura Turbulenta

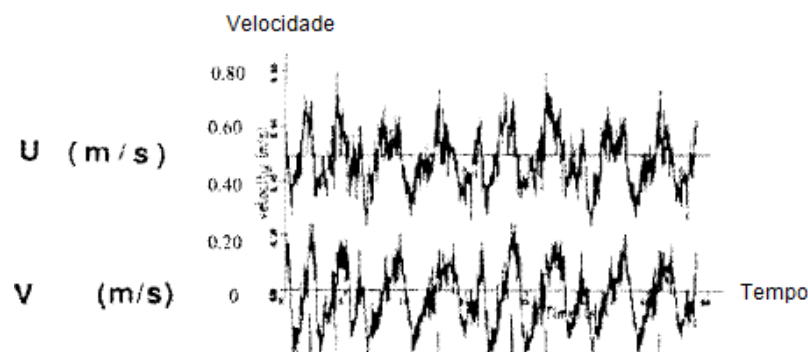
Ao invés de um escoamento laminar onde o fluido se move em camadas contíguas que apenas trocam entre si quantidade de movimento molecular dado que as tensões tangenciais amortecem qualquer tendência de instabilidade, num escoamento turbulento a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluido e

varia em torno de um valor médio (cf. Figura 11). Diz-se, assim, que o escoamento é turbulento, ou seja, apresenta um movimento aleatório não organizado, sobreposto a um valor médio (Nezu e Nakagawa, 1993).

Sendo as forças viscosas e as forças de inércia fulcrais no comportamento do escoamento, a sua relação, representada pelo coeficiente ou número de Reynolds (25) é a grandeza que determina se estamos perante um regime laminar ou turbulento. Sejam  $u$  (m/s) a velocidade média,  $R$  (m) o raio hidráulico e  $\nu$  (m/s<sup>2</sup>) a viscosidade cinemática.

$$Re = \frac{uR}{\nu} \quad (25)$$

O número de Reynolds é adimensional e tem um valor crítico próximo de 2000, sendo que para valores inferiores a este ocorre o regime laminar e para valores superiores a este o regime turbulento.



**Figura 11 – Séries temporais de velocidade longitudinal  $u$  e transversal  $v$  (Adaptada de Shiono e Knight, 1991)**

O facto de a superfície livre do líquido se apresentar lisa, ou até com aparência espelhada, não deve ser tomado como indício de que não existe turbulência (Massey, 2002).

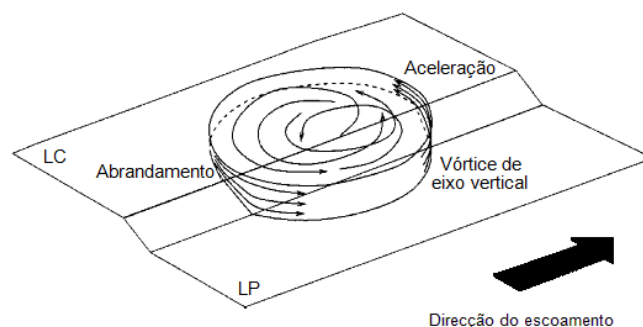
## **2.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM CANAIS DE SECÇÃO COMPOSTA**

A obtenção de um regime permanente uniforme num canal de secção composta, apesar de todas as uniformidades existentes nos parâmetros que o caracterizam, consegue-se apenas garantindo que ao longo do canal a secção não varia, tal como a rugosidade do fundo do canal. Este tipo de escoamento é o mais fácil de abordar do ponto de vista

analítico e é o que com menos frequência se encontra, especialmente em canais curtos, uma vez que é necessário um comprimento mínimo para que o escoamento uniforme fique completamente estabelecido (Massey, 2002). O que facilmente se encontra é sim o regime não uniforme, variável ou transitório, onde existe variação com o tempo da velocidade  $u$  do escoamento, e com isso a altura de água  $H$  e caudal  $Q$  variam em determinado ponto (regime variável), variando também de ponto para ponto (regime não uniforme).

O problema fundamental aquando do estudo de escoamentos em canais de secção composta prende-se com a compreensão da interacção do caudal escoado no leito principal com o caudal escoado nos leitos de cheia dado a altura de água ser inferior nos leitos de cheia e a rugosidade poder ser diferente entre as secções. Estes aspectos geram transferências de massa e de quantidade de movimento que reduzem significativamente a capacidade de descarga do canal.

No escoamento em canais de secção composta desenvolvem-se mecanismos de transferência de quantidade de movimento, traduzidos pelos vórtices de eixo vertical, formados ao longo da interface de ligação entre o LP e o LC dadas as diferenças de velocidades entre eles (*cf.* Figura 12).

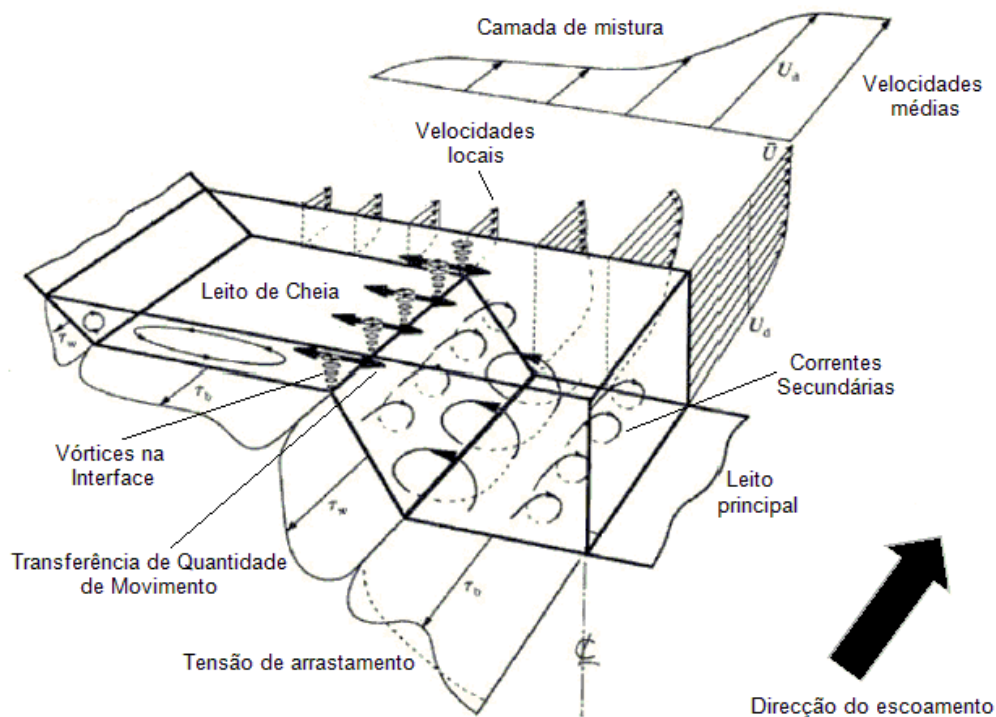


**Figura 12 – Representação esquemática de um vórtice de eixo vertical na interface  
(Adaptada de Prooijen *et al.*, 2005)**

Na Figura 13 apresenta-se a estrutura turbulenta do escoamento em canais de secção composta segundo Shiono e Knight (1991). Para além dos vórtices de eixo vertical mencionados anteriormente são visíveis vórtices de eixo horizontal designados por correntes secundárias, de eixos paralelos mas com sentidos de rotação inversos,



contrariando o movimento (Nezu *et al.*, 1999). A sua origem resulta da anisotropia da turbulência gerada pelo leito (Nezu, 1994).



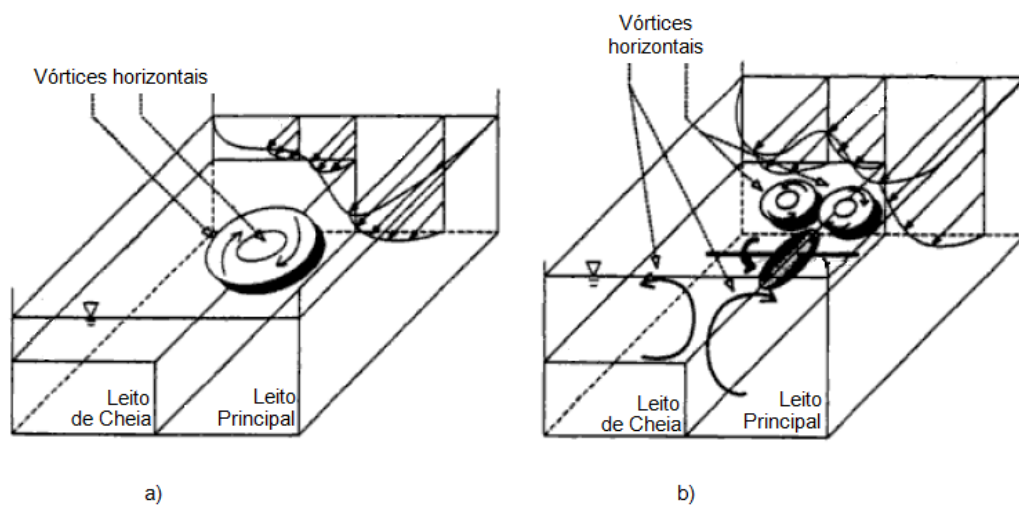
**Figura 13 – Estrutura turbulenta de um canal em secção Composta (Adaptada de Shiono e Knight, 1991)**

Na Figura 13 pode ainda verificar-se o crescimento das velocidades desde a parede lateral do canal até ao centro do leito principal onde tomam o seu valor máximo. As tensões de arrastamento tomam valor nulo junto à superfície livre nas paredes laterais. O seu valor máximo é também no centro do leito principal, antes do qual existe uma inflexão no crescimento, acontecendo o mesmo nos leitos de cheia antes da interface do LC com o LP.

O escoamento em canais de secção composta é influenciado pela altura relativa  $h_r$  (26). Entenda-se por altura relativa o rácio entre as alturas de água impostas no leito principal e nos leitos de cheia, considerando  $H$  a altura de água no leito principal e  $h$  a altura de água nos leitos de cheia.

$$h_r = \frac{(H - h)}{H} \quad (26)$$

Como se pode verificar pela análise da Figura 14, para pequenas alturas de escoamento (alturas relativas inferiores a 0,375) onde o número de Reynolds é bastante elevado (*cf.* Figura 14a), sabe-se que os centros dos vórtices horizontais são quase sempre localizados na junção entre o LP e o LC, ao contrário de escoamentos com alturas relativas superiores a 0,375 onde são gerados vórtices de eixo normal ao escoamento representados pela elipse negra na Figura 14b, que dividem os vórtices de eixo horizontal pelas duas regiões do canal.



**Figura 14 – Vórtices Horizontais – Localização para  $h_r < 0,375$  a) e  $h_r > 0,375$  b)**  
(Adaptada de Nezu *et al.*, 1999)

### 2.2.1. Tensão aparente na interface

A tensão aparente  $\tau_a$  na interface vertical do leito principal com o leito de cheia pode determinar-se por equilíbrio de forças, em regime uniforme (Knight e Demetriou, 1983). A componente gravítica do escoamento deve igualar-se ao somatório das forças de atrito actantes, sejam elas a tensão de arrastamento no fundo  $\tau_0$  e a tensão aparente  $\tau_a$ . Determinada a tensão de arrastamento  $\tau_0$  e conhecida a geometria do canal bem como a altura de água no escoamento imposto, a tensão aparente  $\tau_a$  obtém-se através da conservação da quantidade de movimento aplicada ao leito de cheia ou ao leito principal conforme Eqs. (27a) e (27b), respectivamente.

$$\gamma S_{LC} S_0 - \tau_{0_{LC}} P_{LC} + \tau_a h_{LC} = 0 \quad (\text{leito de cheia}) \quad (27a)$$

$$\gamma S_{LP} S_0 - \tau_{0LP} P_{LP} - 2\tau_a h_{LC} = 0 \quad (\text{leito principal}) \quad (27b)$$

Moreta e Martin-Vide (2010) desenvolveram uma fórmula, Eq. (28), para o cálculo de  $\tau_a$  (para canais grandes e pequenos) com base em regressão de dados experimentais de diversos autores. Esta equação tem em conta o gradiente de velocidades dos leitos  $\Delta U$ , calculado pela diferença das velocidades nos leitos principal e de cheia obtidos pelo método da divisão do canal (Chow, 1959), bem como um coeficiente de fricção  $C_{f_a}$  devidamente calibrado para os parâmetros geométricos do canal em estudo.

$$\tau_a = \frac{1}{2} \rho C_{f_a} (\Delta U)^2 \quad (28)$$

Nesta fórmula foi tida em conta a possibilidade de existência de rugosidades diferentes entre leitos, e com isso os autores sugeriram a Eq. (29).

$$\tau_a = \frac{1}{2} \rho \left[ 0,003 \left( \frac{B}{b} \right) \left( \frac{h}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{H-h}{H} \right]^{\frac{1}{3}} - 0,002 \left[ \frac{H-h}{H} \right]^{\frac{1}{3}} \left( \frac{n_f - n_c}{n_c} \right)^2 \right] (\Delta U)^2 \quad (29)$$

Na expressão (29)  $n_c$  e  $n_f$  são os coeficientes de Manning para o leito principal e leito de cheia respectivamente, determinados por  $n = 1/K_s$  com  $K_s$  o coeficiente de rugosidade de Strickler do leito.

### 2.2.2. Distribuição da viscosidade efectiva

A viscosidade turbulenta  $\nu_t$  pode analisar-se segundo Prooijen *et al.* (2005) como o somatório das componentes  $\nu'_t$  e  $\nu''_t$ , correspondendo respectivamente à componente turbulenta da viscosidade no fundo e à contribuição da turbulência na interface do leito principal com o leito de cheia, calculadas por respectivamente.

$$\nu'_t = \alpha D \sqrt{c_t} U(y) \quad (30)$$

$$v''_t = \frac{D_m}{D(y)} \beta^2 \delta^2 \left| \frac{dU(y)}{dy} \right| \quad (31)$$

Nas expressões anteriores  $D$  representa a altura de água, respectivamente igual a  $H$  no leito principal e a  $h$  no leito de cheia, sendo  $\alpha = 0,10$  uma constante previamente determinada. O coeficiente  $c_f$  é determinado para o leito principal através da Eq. (32) e para o leito de cheia pela Eq. (33).

$$c_{f_c} = \frac{gHS_0}{\overline{U_c}^2} \quad (32)$$

$$c_{f_f} = \frac{ghS_0}{\overline{U_f}^2} \quad (33)$$

No cálculo da expressão (31)  $D_m$  é a média das alturas  $H$  e  $h$ , e  $\beta = 0,07$  uma constante que varia num intervalo de valores, sendo no entanto este o valor proposto por Prooijen *et al.* (2005) como o óptimo para todos os casos.

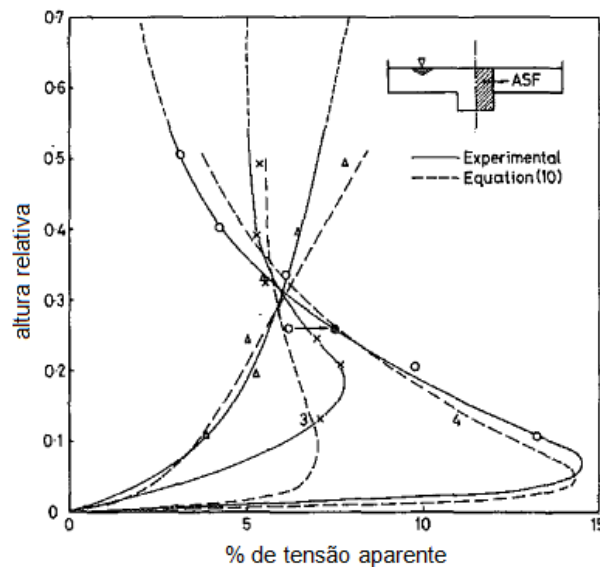
### 2.2.3. Escoamento em canal de secção composta com leito liso

Inúmeros estudos têm sido elaborados com base em experiências laboratoriais que simulam o comportamento dos escoamentos em canais de secção composta. O escoamento num canal composto difere do escoamento num canal simples na medida em que no primeiro a água transborda do seu leito principal aquando da ocorrência de fortes precipitações, inundando os seus leitos de cheia. Uma vez que a forma da secção transversal e a rugosidade varia do canal principal para os leitos de cheia, geralmente o escoamento em canal composto é muito complexo e implica para o seu conhecimento estudos para diferentes alturas relativas ( $h_r$ ), larguras de leitos ( $B_{LC}$  e  $B_{LP}$ ), inclinação do fundo ( $S_0$ ) e relação entre rugosidades. A transferência de quantidade de movimento que se dá entre o leito principal e os leitos de cheia geralmente diminui a capacidade de descarga do leito principal e conseqüentemente, de todo o canal. Este efeito é denominado efeito

cinemático (“Kinematic effect” na língua inglesa) (Yang *et al.*, 2007). A compreensão dos fenómenos que explicam esta diminuição de capacidade de descarga de canais compostos face ao leito principal e leitos de cheia considerados separadamente, implica o conhecimento do perfil transversal de velocidades longitudinais, e diversos estudos têm sido dedicados ao conhecimento desses perfis, entre eles, Shiono e Knight (1991) e Lambert e Sellin (1996).

As primeiras experiências laboratoriais por Posey (1967), Sellin (1964) e Zheleznyakov (1971) mostraram que a aplicação de métodos de canal simples a canais compostos não era precisa na avaliação da sua capacidade de vazão. Estudos posteriores foram realizados por Rajaratnam e Ahmadi (1979), Myers *et al.* (1975), Knight e Demetriou (1983), Knight e Hamed (1984) e Knight *et al.* (2004) focados na interacção entre o LP e os LC bem como na distribuição de tensões tangenciais na fronteira lisa (Yang *et al.*, 2007).

Com base nas relações de Patel (1965), Myers (1978) desenvolveu uma expressão de estimativa da tensão aparente que foi seguida por outros autores como Knight e Demetriou (1983) que elaboraram uma experiência que comparou estes valores aos experimentais (*cf.* Figura 15). Destes ensaios num canal de secção composta com declive constante (0,0966%), 15 m de comprimento e paredes laterais ajustáveis com 6,10 m de largura máxima foram registadas algumas considerações. Partindo dos valores das tensões nas paredes de cada leito, foi deduzida uma expressão para o valor da tensão aparente calibrada para diferentes alturas relativas ( $h_r$ ), relações de larguras de leitos ( $B_{LC}$  e  $B_{LP}$ ) e das velocidades médias nos LP e LC. Reconheceu-se o facto de as tensões de corte actuarem no perímetro molhado de maneira diferente, variando sistematicamente com a variação da altura relativa. Do mesmo modo foi demonstrado que a tensão de corte na zona de interacção do LP com o LC é fortemente influenciada pela profundidade e é sempre positiva, indicando assim que os escoamentos dos leitos de cheia retardam o escoamento do leito principal (Knight e Demetriou, 1983).

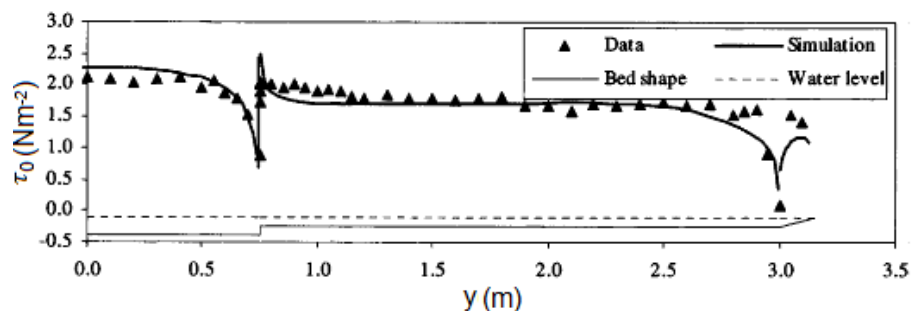


**Figura 15 – Tensão aparente na interface entre o leito principal e o leito de cheia (adaptada de Knight e Demetriou, 1983)**

Mais recentemente, o trabalho de investigação sobre fenómenos ocorridos em canais de secção composta tem sido realizado com base numa quantidade significativa de dados de modelação física em laboratório, tal como o descrito por Knight e Sellin (1987) no *Flood Channel Facility* (FCF), um canal com 60 m de comprimento e 10 m de largura construído em 1983 no Reino Unido, configurável a qualquer tipo de condições para ensaios em canal composto. Knight e Shiono (1990) analisaram as características do transbordo do escoamento e as tensões de Reynolds,  $\tau_{zx}$  e  $\tau_{yx}$  na região de forte tensão lateral introduzida pela variação transversal de profundidade (Knight e Shiono, 1990), desenvolvendo o *Shiono and Knight Method SKM*, um modelo de distribuição lateral (LDM) que permite antever a distribuição lateral em profundidade da velocidade média e tensão tangencial ou de corte em canais e rios (Yang *et al.*, 2007).

Com o desenvolvimento da capacidade computacional as simulações numéricas ganharam um enorme significado na investigação de problemas com fluidos, e com ele também a turbulência começou a ser modelada de um modo eficiente. Liu *et al.* (2009) mostrou que o *Lattice Boltzmann method*, um modelo de simulação de grandes escalas que contabiliza as trocas de massa na interface do LP e LC, é capaz de modelar as características de um escoamento turbulento em canais de secção composta com uma precisão suficientemente razoável a ponto de poder ser utilizado em aplicações práticas da

engenharia. Resultados de simulações numéricas tridimensionais utilizando as equações de Navier-Stokes forneceram valores de tensões de arrastamento e de Reynolds bem como de velocidade e energia cinética turbulenta, que comparados com outros obtidos experimentalmente no *Flood Channel Facility* (FCF) demonstraram a sua precisão. A título de exemplo, na Figura 16 apresentam-se as tensões de arrastamento nos leitos de cheia obtidas experimentalmente no *Flood Channel Facility* (FCF) e numericamente por Rameshwaran e Naden (2003), com uma altura de água  $H=0,3$  m.



**Figura 16 - Comparação de tensões de arrastamento em LC –  $H=0,3$ m (adaptada de Rameshwaran e Naden, 2003)**

A análise dos resultados demonstrou que as distribuições de velocidade são muito próximas fora da zona de interacção dos leitos. Também as tensões de arrastamento estão muito próximas das experimentais excepto no LP para alturas relativas muito baixas. A alta rugosidade calibrada para o escoamento uniforme varia com a profundidade do escoamento reflectindo a inadequada modelação da interacção entre os escoamentos do LP e LC. Ainda assim para escoamentos em leito composto com alturas relativas de 0,25, este modelo mostrou resultados muito próximos dos experimentais, demonstrando que usando modelos tridimensionais é possível obter resultados razoáveis (Rameshwaran e Naden, 2003).

Paralelamente ao desenvolvimento na modelação computacional e simulação tridimensional, a expressão da tensão aparente desenvolvida por Meyers (1978) foi sendo seguida por outros autores, surgindo dela outras expressões calibradas para os parâmetros hidráulicos ( $h_r$ ) e geométricos ( $B_{LC}$  e  $B_{LP}$ ) dos canais em estudo, nunca podendo no entanto ser generalizadas. Permitiam apenas concluir a haver uma expressão geral, esta seria fortemente influenciada por estes parâmetros. Com vista à obtenção da generalização de

uma expressão que quantificasse a tensão de corte aparente Moreta e Martin-Vide (2010) dimensionaram com base no gradiente de velocidades do LP e LC, parâmetros geométricos do canal e do coeficiente de atrito aparente, duas expressões (aplicadas a canais de diferentes escalas) que se aproximam bastante de inúmeros resultados provenientes de ensaios laboratoriais. Este trabalho destaca a importância de incluir na fórmula geral o efeito produzido pela rugosidade nos leitos de cheia bem como o efeito desse tipo de rugosidade (Moreta e Martin-Vide, 2010).

#### **2.2.4. Escoamento em canal de secção composta com leito rugoso**

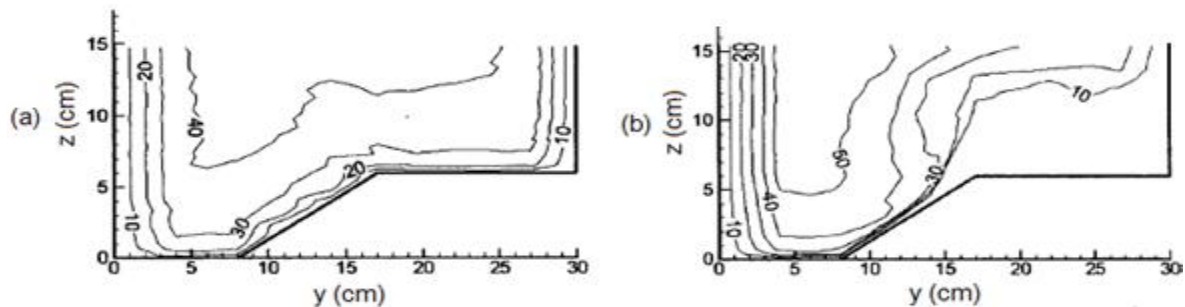
Em rios naturais os leitos de cheia estão muitas vezes ocupados por diversos tipos de vegetação, com variações sazonais e temporais. A sua influência geralmente é notada pelo aumento da resistência ao escoamento e pela alteração das distribuições de velocidade. Do mesmo modo os rios vêm afectada a sua capacidade de descarga e taxa de transporte de sedimentos (Knight, 2001, Yang *et al.*, 2007).

Darby e Thorne (1996) desenvolveram um modelo computacional capaz de prever o impacto que o crescimento da vegetação provoca na resistência e na capacidade do escoamento. Este modelo provou com base em curvas de vazão determinadas experimentalmente, ser capaz de simular curvas de descarga em canais com geometria e secção arbitrária, com ou sem rugosidade no leito principal e leitos de cheia (Darby e Thorne, 1996). Mais tarde Thornton *et al.* (2000) examinaram experimentalmente a tensão aparente na interface entre o leito principal e o leito de cheia com e sem vegetação. Para tal foi utilizado um canal experimental composto pelo LP com 0,46 m de largura e um LC esquerdo com 0,76 m de largura, ambos com 15 m de comprimento e um declive aproximado de 0-2%. Através de expressões enunciadas por vários autores Thornton *et al.* (2000) desenvolveram uma expressão, estimativa do cálculo da tensão aparente, que tem em conta um parâmetro característico do efeito retardador do escoamento causado pela presença de determinada densidade de vegetação no leito de cheia. Este estudo veio a provar uma vez mais a forte influência que a tensão aparente na interface entre o LP e o LC tem na resistência ao escoamento de canais de secção composta.

Relações de diferentes capacidades de vazão e distribuições de velocidades foram analisadas por Yang *et al.* (2007) simulando em laboratório diferentes rugosidades introduzidas nos leitos de cheia. Estas simularam relva, arbustos e árvores. Dos ensaios

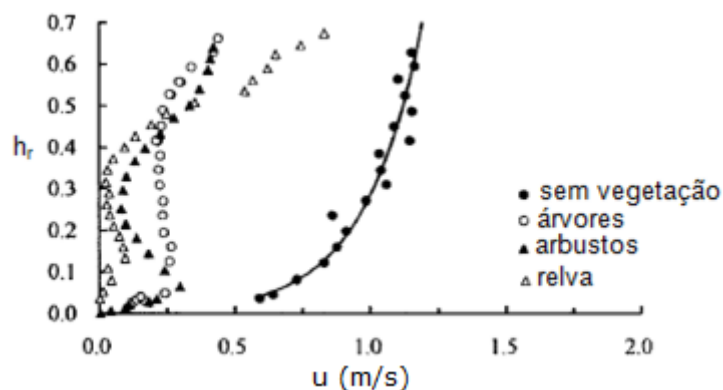


realizados foi possível verificar que os arbustos e a relva ofereciam maior resistência ao escoamento do que as árvores. Mostraram ainda o aumento significativo das velocidades no LP após colocação de vegetação nos leitos de cheia bem como a diminuição nos LC, para todas as rugosidades ensaiadas. A Figura 17 demonstra inequivocamente esse facto através da análise das isolinhas de velocidades longitudinais para o caso de fundo liso (a) e fundo rugoso com aplicação de relva sintética (b), nas mesmas condições de escoamento.



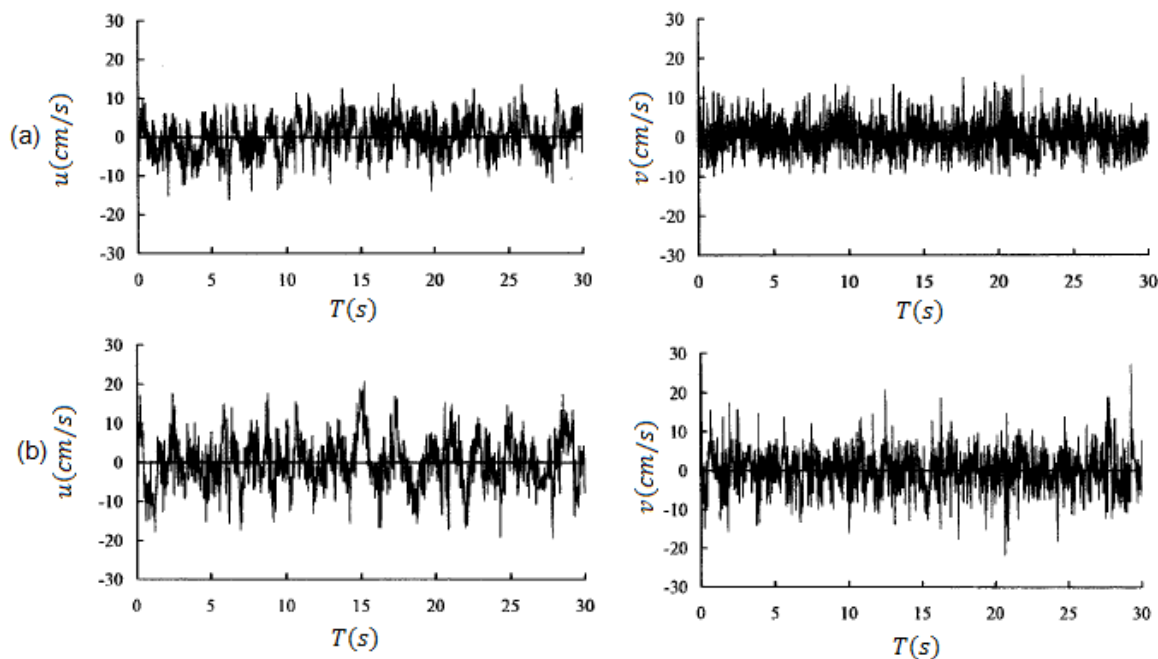
**Figura 17 – Velocidades longitudinais em fundo liso a) e fundo rugoso b) (Adaptada de Yang et al., 2007)**

Em todos os casos, na presença de rugosidade as distribuições de velocidade deixaram de seguir um perfil logarítmico (cf. Figura 18 para a posição junto à linha central do LC).



**Figura 18 - Perfis de velocidade (Adaptada de Yang et al., 2007)**

O aumento da intensidade de turbulência na presença de vegetação foi analisado com base na variação temporal das componentes  $u$  (cm/s) e  $v$  (cm/s), de flutuação da velocidade na direcção longitudinal e direcção transversal respectivamente. Esta flutuação mostrou ser periódica aproximando-se de uma distribuição normal. Sejam na Figura 19 a) o caso de fundo liso e (b) rugosidade devida à aplicação de relva sintética.



**Figura 19 – Variação temporal das componentes de flutuação da velocidade da velocidade  $u$  e  $v$  (Adaptado de Yang *et al.*, 2007)**

As medidas de turbulência foram medidas com recurso a um aparelho de medição de velocidades instantâneas de alta frequência, *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV).

Ensaio experimentais conduzidos por Sun e Shiono (2009) demonstraram o efeito da vegetação na diminuição da capacidade de vazão e tensão de arrastamento. Shiono *et al.* (2009) reformularam o *Shiono and Knight Method SKM* considerando na sua formulação de base uma força adicional de arrastamento devida à influência da presença de vegetação no escoamento. Do modelo modificado resultaram valores semelhantes aos experimentais (Sanjou *et al.* 2010), deixando não definidas algumas incertezas sobre relações de turbulência.

Com a mesma tecnologia de medição utilizada por Yang *et al.* (2007), um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV), Sanjou *et al.* (2010) mediram três componentes de velocidade instantânea e tentaram uma vez mais explicar fenómenos de turbulência em canais de secção composta com vegetação nos leitos de cheia. Foi simulado o escoamento com árvores nos leitos de cheia e os resultados permitiram demonstrar que o *Shiono and Knight SKM* é fiável para este tipo de estimativa uma vez que permitiu obter resultados muito próximos dos do ADV (*cf.* Figura 20) para este estudo (Sanjou *et al.* 2010).

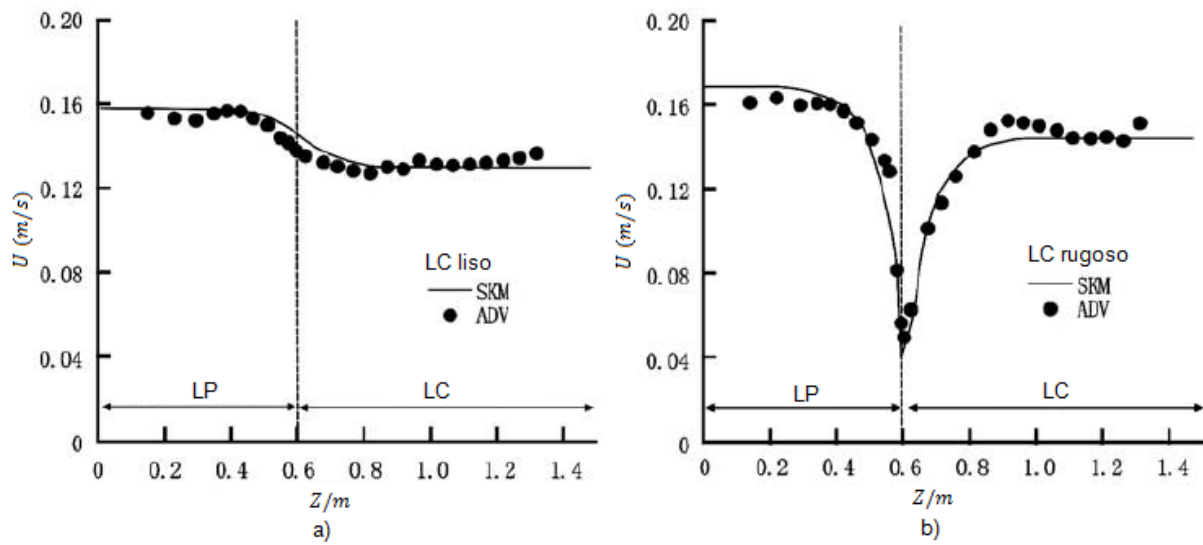


Figura 20 – Comparação entre *SKM* e *ADV*, com LC liso a) e LC rugoso b) (Adaptada de Sanjou *et al.* 2010)



### 3. PROCEDIMENTO E INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

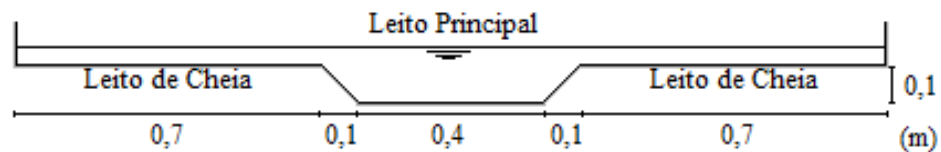
No presente texto pretende-se dar a conhecer o canal de secção composta instalado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Canal Veiga da Cunha (CVC) (*cf.* Figura 21), onde foram realizados os ensaios experimentais no âmbito desta dissertação. Este canal simula o escoamento nos leitos principal e de cheias e põem em evidência a interacção entre ambos. Será do mesmo modo descrito o processo experimental realizado, a caracterização do escoamento bem como o processo de medição de velocidades e respectivo equipamento de medição.



**Figura 21 – Canal Veiga da Cunha – LNEC**

### 3.1. CANAL DE SECÇÃO COMPOSTA

O Canal Veiga da Cunha, instalação experimental que depois de adaptada foi utilizada nos ensaios adiante descritos, possui um canal simétrico com 10 m de comprimento e 2 m de largura, de geometria trapezoidal no leito principal, com 0,4 m de largura do rasto e 0,10 m de altura, com 0,7 m de largura de leitos de cheia. O canal apresenta um declive de 0,0011 m/m. A secção transversal é a que se apresenta na Figura 22.



**Figura 22 – Dimensões da Secção do canal**

A alimentação de água do canal é feita através de um sistema de bombagem (cf. Figura 23) que alimenta um reservatório elevado através de um reservatório subterrâneo (cf. Figura 24), de onde a água sai e é dividida através de uma bifurcação na tubagem, para leito principal e leitos de cheia. Após a separação, o controlo é efectuado de forma independente por válvulas de seccionamento e medida por dois caudalímetros. Uma vez controlado o caudal de entrada, a água sai das tubagens separada por placas metálicas. Na zona de montante foram também colocados sistemas de estabilização de caudal.



**Figura 23 – Sistema de bombagem do reservatório subterrâneo para o reservatório elevado**



**Figura 24 – Indicação das posições dos sistemas adaptados ao canal**

O reservatório elevado anteriormente referido possui um sistema descarregador que garante uma altura de água constante quando atinge a sua capacidade máxima. Assim o escoamento que cai por gravidade do reservatório e é controlado pelas válvulas de seccionamento, tem um caudal constante. Por sua vez a água que não entra nas tubagens de alimentação do canal, é directamente descarregada para o depósito subterrâneo.

A necessidade do sistema de estabilização de escoamento prende-se pela dimensão limitada do comprimento do canal experimental, que pode não ser suficientemente longo como o que para determinado caudal de saída o escoamento demora a estabilizar, podendo assim realizar-se os ensaios pretendidos sem que existam transferências de massa significativas entre subsecções.

Este sistema foi elaborado colocando na zona de alimentação dos leitos de cheia uma contracção implementada através de tijolos cerâmicos furados, seguidos de tubagens empilhadas (*cf.* Figura 25). Esta contracção não só direcciona o escoamento como também provoca uma perda de carga considerável dada a altura de água a montante destas tubagens (Bousmar *et al.* 2005).





Legenda:

- 1 - Entrada de água para leitos de cheia
- 2 - Entrada de água para leito principal
- 3 - Chapa metálica - separação estanque
- 4 - Tijolos cerâmicos furados
- 5 - Pilha de tubagens
- 6 - Placa de Poliestireno
- 7 - Placa de madeira regulável

**Figura 25 – Sistema de estabilização do escoamento**

As placas de Poliestireno estão presas longitudinalmente através de fios e confinadas entre o muro do canal e a chapa metálica de separação dos leitos principal e de cheia, de modo a poderem apenas deslocar-se em altura, flutuando sobre o escoamento dos leitos de cheia, de forma a estabilizar a superfície livre. Houve a necessidade de criar referências para, em fase experimental, todas as medições poderem ter sido elaboradas com organização e precisão. Para tal, longitudinalmente ao canal foram aparafusadas calhas por onde se consegue mover uma plataforma com rodas que rola sobre as calhas que lhe servem de carris, sendo esta a chamada cota X do canal, medida desde um zero definido a montante com o auxílio de uma fita métrica agregada à calha de um dos lados do canal (*cf.* Figura 26).

A cota Y é a cota referente à largura do canal, que permite leituras de vários posicionamentos através de uma segunda fita métrica colada ao próprio suporte/plataforma por onde se descola e se ajusta um suporte. A cota referente à altura de água, designada cota Z, permite leituras através de um hidrómetro de ponta amovível, com nónio acoplado, com uma exactidão de  $\pm 0,1$  mm.





**Figura 26 – Posição dos eixos das coordenadas espaciais no canal**

A jusante do canal existem comportas planas ajustáveis (*cf.* Figura 27), uma basculante no leito principal segundo o eixo horizontal através de uma articulação manuseável no exterior do canal, funcional com ou sem a existência de escoamento, e uma em cada leito de cheia, reguláveis apenas quando não há escoamento no canal, sofrendo exclusivamente regulação no sentido ascendente e descendente.

Depois de transpor estas comportas, o escoamento volta a entrar no reservatório subterrâneo para posterior alimentação do reservatório elevado, alimentando constantemente o canal experimental.



**Figura 27 – Comportas a jusante do canal – Regulação da comporta de leito principal**

As comportas são reguladas tendo em conta os caudais que se impõem a montante para as diferentes alturas relativas impostas ao escoamento que se pretende estudar.

A regulação destas comportas é essencial na medida em que só assim se consegue garantir que para os diferentes caudais e alturas relativas impostas nos escoamentos, é possível impor aos mesmos um regime uniforme. A imposição do mesmo implica a não alteração das características hidráulicas ao longo do canal, nomeadamente as alturas de água e a distribuição de caudais entre as subsecções.

### **3.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E CONTROLO**

#### **3.2.1. Hidrómetros**

Existem no canal hidrómetros instalados a montante e a jusante do canal (*cf.* Figura 28), que permitem a leitura das alturas de água através de tubos ligados ao fundo do mesmo. No carro de medições está também disponível um hidrómetro que permite a medição da altura de água em qualquer ponto do canal.



**Figura 28 – Hidrómetro a jusante ligado ao fundo do canal**

### 3.2.2. Caudalímetros

Os Caudalímetros ou Medidores electromagnéticos de Caudal (marca Altometer, modelo SC100AS) foram instalados na estação experimental são equipamentos de medição volumétrica de água e apresentam uma exactidão mínima de  $\pm 0,1$  l/s, contendo erros de registo identificados através da calibração efectuada no início da campanha experimental.



Legenda:

- 1 - Válvula de seccionamento do Leito principal
- 2 - Válvula de seccionamento dos Leitos de cheia
- 3 - Caudalímetro do Leito principal
- 4 - Caudalímetro dos Leitos de Cheia

**Figura 29 – Caudalímetros instalados na estação experimental**

Com o auxílio destes equipamentos é possível ajustar as válvulas de seccionamento instaladas nas tubagens de entrada de caudal para o canal experimental, impondo ao mesmo o caudal pretendido quer para o leito principal, quer para os leitos de cheia. O caudal medido para os leitos de cheia através do caudalímetro é dividido à entrada do canal sendo assim o somatório dos caudais que escoam para cada leito.

Segundo as tabelas fornecidas pela calibração dos equipamentos foi possível construir os Quadro 1 e Quadro 2 de correspondência entre o valor de leitura ( $Q$ ) do caudalímetro e o valor real de caudal que entra no canal, caudal de referência ou de cálculo ( $Q_0$ ).

**Quadro 1 – Correspondência entre Caudal de Referência  $Q_0$  (l/s) e Caudal de Leitura  $Q$  (l/s) para leito principal**

$0 < Q < 8$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q$
$9 < Q < 93$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,1$
$94 < Q < 100$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,2$

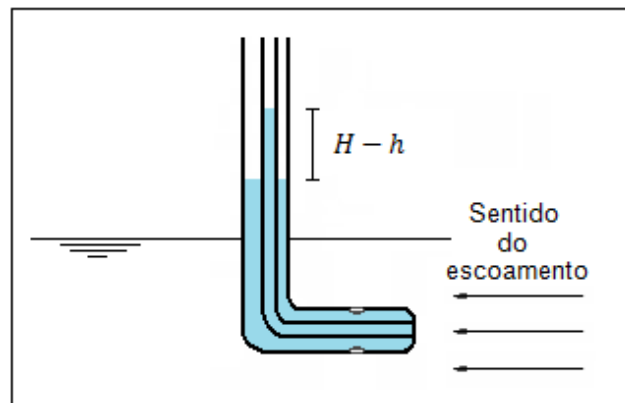
**Quadro 2 – Correspondência entre Caudal de Referência  $Q_0$  (l/s) e Caudal de Leitura  $Q$  (l/s) para leitos de cheia.**

$0 < Q < 10$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q$
$11 < Q < 32$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,1$
$33 < Q < 53$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,2$
$54 < Q < 74$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,3$
$75 < Q < 96$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,4$
$97 < Q < 100$	$\leftrightarrow$	$Q_0 = Q - 0,5$

### 3.2.3. Tubo de Pitot

O tubo de Pitot é utilizado frequentemente quando em experiências laboratoriais é necessária a medição de velocidades de escoamento, uma vez que este instrumento funciona como um medidor de pressão diferencial, comparando pressões estáticas e dinâmicas medidas num determinado ponto do escoamento.

O instrumento possui duas condutas distintas conforme indicado na Figura 30, uma interior alimentada na boca da sonda e outra exterior alimentada através de furos colocados em torno da circunferência do tubo onde a curvatura das linhas de corrente é muito pequena, e a pressão medida inferior à pressão da condução interior.

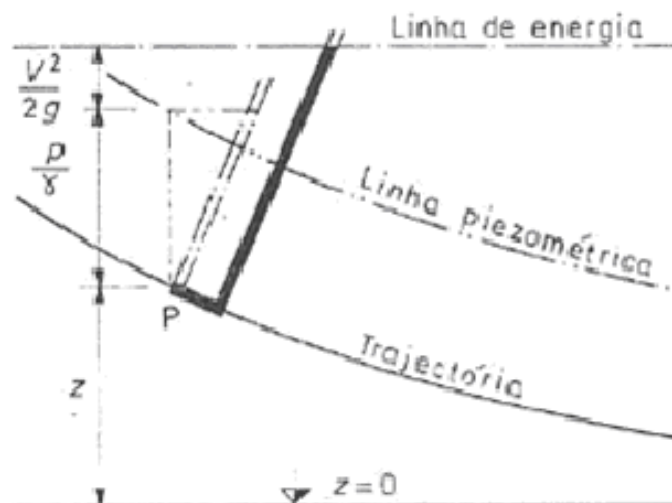


**Figura 30 – Esquema de funcionamento do tubo de Pitot**

Na conduta exterior conhece-se a cota piezométrica dada por  $h = (p/\gamma) + z$  através da expressão geral (34), enquanto na conduta interior a altura a que a água sobe correspondente à carga hidráulica (35). Os valores da velocidade são assim calculados conhecendo a diferença de cotas atingidas pelo líquido nas duas condutas representando a altura cinética,  $H - h = \mu^2 / 2g$  conforme ilustrado na Figura 31.

$$u = \sqrt{2g(H - h)} \quad (34)$$

$$h = (p/\gamma) + z + (\mu^2 / 2g) \quad (35)$$



**Figura 31 – Tubo de Pitot (adaptado de Massey, 2002)**

No caso particular desta experiência, o tubo de Pitot utilizado (*cf.* Figura 32) tem as características técnicas indicadas no Quadro 3 e está ligado a um captor ou transdutor diferencial de pressões, que mede a diferença de potencial ( $V$ ) provocada pela diferença das pressões estáticas e dinâmica (em Volt).



**Figura 32 – Tubo de Pitot utilizado**

**Quadro 3 – Características Técnicas Tubo de Pitot utilizado**

Fornecedor	Modelo
U.S. Bureau of Reclamation	Backflushing Pitot Tube
Dimensão Vertical	0,650 m
Dimensão Horizontal	0,055 m
Diâmetro Exterior	0,0032 m

A ligação do captor ou transdutor diferencial de pressões utilizado (*cf.* Figura 33) ao tubo de Pitot foi feita com tubos de borracha totalmente flexíveis e transparentes. Dessa forma, era possível verificar que não havia bolhas de ar no seu interior. Por sua vez, o



captor está ligado ao condicionador de sinal Spider8 que fornece instantaneamente ao computador registos da diferença de potencial. Através da calibração obteve-se a relação entre a diferença de potencial e a pressão (em m de coluna de água). A partir da pressão obteve-se a velocidade de escoamento na posição onde o tubo de Pitot se encontra, através do software Catman.



**Figura 33 – Transdutor diferencial de pressões**

O sistema descrito carece no entanto de calibração para a realização dos ensaios pretendidos, que foi feita todos os dias antes das medições para garantir resultados precisos. O processo de calibração consiste em desconectar um dos tubos de borracha flexível do tubo de Pitot para ser ligado a um reservatório com água onde se encontra instalado um hidrómetro (cf. Figura 34), enquanto o tubo de Pitot é posto dentro de um copo com água a altura constante.



**Figura 34 – Hidrómetro instalado num reservatório**

Nestas condições a calibração do Pitot é feita fazendo 3 a 4 medições de diferença de potencial para alturas diferentes de água, sendo a primeira com água até sensivelmente meio do reservatório, e restantes com alturas sucessivamente superiores em cerca de 1 cm. De notar a necessidade de purgar o sistema antes de se efectuarem estas leituras, acautelando que não existe ar no sistema. Durante todas as medições tem ainda de se ter especial cuidado para não existir qualquer toque no suporte do sistema, pois dada a sua sensibilidade, qualquer distúrbio adultera os registos das medições em curso.

Com estas medições de diferença de potencial, é possível obter a relação entre aquela variável e a variação de pressão  $\Delta_p$  com a qual se obtém o declive da equação de calibração (cf. Figura 35) do tubo de Pitot, por  $1/(\Delta V / \Delta_p)$ , sendo neste caso a relação de  $\Delta V / \Delta_p$  feita através dos seus valores médios.

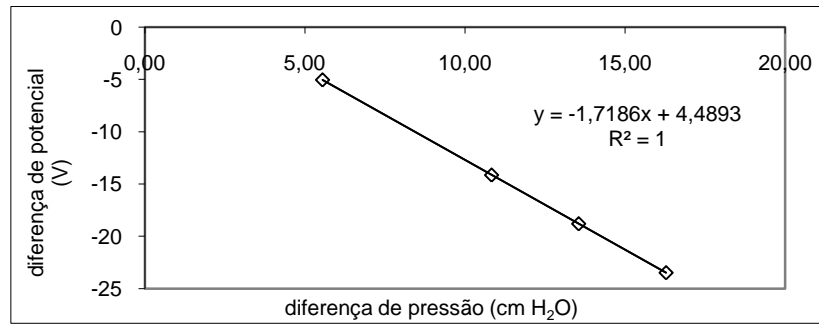
Determinado o declive da curva de calibração, o tubo de borracha flexível que estava ligado ao reservatório torna a ser ligado ao tubo de Pitot com este debaixo de água para não haver nenhuma entrada de ar no sistema, e depois de ser novamente purgado e estabilizar, está em condições de serem feitas medições.

No início e regularmente entre medições foram efectuadas com o Pitot dentro de um copo com água a altura constante, medições às quais chamámos *zero*, que permitem no instante em que foram tirados, elaborar uma nova curva de calibração, ligeiramente diferente da anterior, e corrigir os valores medidos após esta medição. O ideal e o que acontece com frequência são os *zeros* tirados entre medições não variarem, confirmando que a calibração do tubo de Pitot está correcta.

A equação demonstrada a título exemplificativo em (36) apresenta um valor de declive  $1/(\Delta V / \Delta_p) = -0,0058241$ , sendo o zero desta equação de calibração o quociente entre a diferença de potencial *zero* medida com o Pitot dentro do copo e a relação  $\Delta V / \Delta_p$ .

$$\Delta H(\text{cm}) = -0,0058241 \times \text{diferença de potencial} + 0,0013312 \quad (36)$$





**Figura 35 – Exemplo de Curva de Calibração do Tubo de Pitot**

### 3.3. CÁLCULO DAS TENSÕES DE ARRASTAMENTO

#### 3.3.1. Tensões de arrastamento em fundo liso

Em fundo liso as tensões de arrastamento  $\tau_0$  foram determinadas através das curvas de Patel com base nas velocidades medidas junto ao fundo, seguindo as suas recomendações de Calibração do tubo de Preston (Hollingshead e Rajaratnam, 2010).

Vários resultados permitiram chegar a curvas de calibração do tubo de Preston que determinam o parâmetro  $x^*$  através da expressão (37) considerando apenas no seu cálculo a diferença de pressão medida no tubo de Pitot  $\Delta_p$ , diâmetro  $d$  do tubo e os factores de escoamento viscosidade cinemática do fluído  $\nu$  e densidade do fluído  $\rho$ .

$$x^* = \log_{10} \left( \frac{\Delta P d^2}{4\rho\nu^2} \right) \quad (37)$$

$$y^* = \log_{10} \left( \frac{\tau_0 d^2}{4\rho\nu^2} \right) \quad (38)$$

Um novo parâmetro  $y^*$  definido na expressão (38) que compreende a tensão de arrastamento  $\tau_0$  pode ser relacionado com o anterior tendo em conta a correspondência de valores descrita abaixo para a dimensão do parâmetro  $x^*$ .

$$\begin{aligned}
x^* &= y^* + 2\log_{10}(1,95y^* + 4,1) && \text{para } 3,5 < x^* < 5,3 \\
y^* &= 0,8287 - 0,181x^* + 0,1437x^{*2} - 0,006x^{*3} && \text{para } 1,5 < x^* < 3,5 \\
y^* &= 0,5x^* + 0,037 && \text{para } 0 < x^* < 1,5
\end{aligned} \tag{39}$$

Estando determinado o valor do parâmetro  $y^*$ , pela expressão (38) tem-se o valor da tensão de arrastamento  $\tau_0$ .

Resumindo, partindo da diferença de pressão  $\Delta_p$  medida no tubo de Pitot determina-se pela expressão (37) o parâmetro  $x^*$  com o qual através das expressões (39) se determina  $y^*$ . Uma vez determinado  $y^*$  tem-se pela expressão (38) o valor da tensão de arrastamento  $\tau_0$  pretendido.

### 3.3.2. Tensões de arrastamento em fundo rugoso

As curvas de calibração de Patel não têm em conta o valor da rugosidade absoluta de Nikuradse  $k_s$ , pelo que para fundos rugosos esta calibração não nos permite efectuar o cálculo das tensões de arrastamento  $\tau_0$ .

Recorrendo-se assim à calibração sugerida por Wu e Rajaratnam (2000) que baseando-se na equação logarítmica de distribuição de velocidades (40) definida com a influência da rugosidade absoluta  $k_s$ , relaciona a variação de pressão  $\Delta p$  (41) indicada pelo tubo localizado na face da fronteira rugosa (38) com a tensão de arrastamento  $\tau_0$  no mesmo ponto.

$$\frac{u_0}{u_*} = 5,75 \log \left( \frac{y_0}{k_s} \right) + B \tag{40}$$

$$\Delta p = \frac{\rho u_0^2}{2} \tag{41}$$

Na expressão anterior considera-se  $y_0$  como a distância entre o centro geométrico do tubo e o ponto da fronteira rugosa onde estão a ser medidas a velocidade  $u_0$  no centro

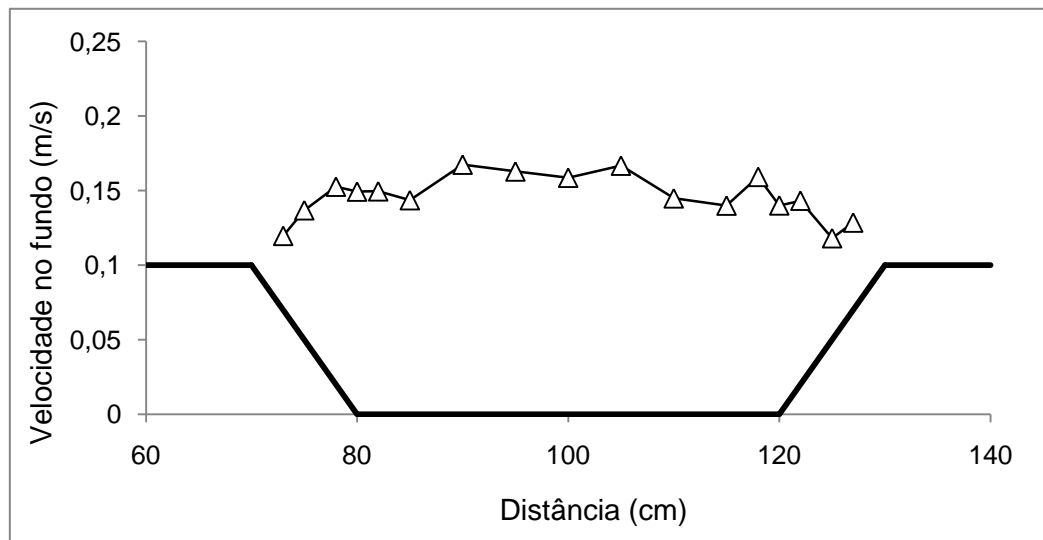
geométrico do tubo e a velocidade  $u$ , na fronteira rugosa, esta última que se relaciona com a tensão de arrastamento  $\tau_0$  por (42) onde  $\rho$  é a densidade do fluido.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (42)$$

Calculando-se inicialmente as velocidades  $u_0$ , velocidades no centro geométrico do tubo de diâmetro  $d$ , nas posições indicadas no Quadro 4 com a distribuição dada pela Figura 36, que com o valor da rugosidade absoluta  $k_s$  determinado adiante nesta dissertação (capítulo 4.1) e da viscosidade cinemática do fluido  $\nu$ , nos permitem determinar os parâmetros  $R_0$  através da expressão (43) para cada velocidade  $u$ , medida. O parâmetro  $R_s$  (44) relaciona-se do mesmo modo com a velocidade  $u$ , que se pretende determinar.

$$R_0 = \frac{u_0 K_s}{\nu} \quad (43)$$

$$R_s = \frac{u_* K_s}{\nu} \quad (44)$$



**Figura 36 – Velocidades determinadas experimentalmente na fronteira rugosa**

Na equação de distribuição de velocidades (40) o primeiro termo do segundo membro pode ser escrita por  $A = 5,75 \log \left( \frac{y_o}{k_s} \right)$ , e substituindo-lhe as equações (43) e (44) no primeiro ramo, chegamos a uma equação (45) que nos permite relacionar os parâmetros  $R_s$  e  $R_o$ .

$$R_o = AR_s + BR_s \quad (45)$$

O coeficiente  $B$  determina-se por uma série de expressões que têm em conta a dimensão de  $R_s$  mas uma vez conhecida a aproximação da variação de  $BR_s$  a duas equações lineares, pode igualar-se  $BR_s = aR_s + b$  com  $a$  e  $b$  constantes conhecidas por (46):

$$\begin{aligned} a = 9,94 \quad e \quad b = -4,70 & \quad \text{para} \quad 1 < R_s < 14,1 \\ a = 8,30 \quad e \quad b = 19,50 & \quad \text{para} \quad 14,1 < R_s < 70 \\ a = 8,4 \quad e \quad b = 0 & \quad \text{para} \quad 70 < R_s \end{aligned} \quad (46)$$

Sendo à partida desconhecido o valor de  $R_s$ , na expressão que o determina (47) começamos por considerar valores de 8,30 e 19,50 para as constantes  $a$  e  $b$ . Após determinado um valor de  $R_s$  com base nestes valores, recalcula-se  $R_s$  através da mesma expressão, considerando agora constantes  $a$  e  $b$  de acordo com o  $R_s$  determinado, aproximando o resultado ao seu valor real.

$$R_s = \frac{R_o - b}{A + a} \quad (47)$$

Conhecido o valor do parâmetro  $R_s$  é finalmente possível determinar pela expressão (44) a velocidade  $u$ , na fronteira rugosa, que se relaciona com a densidade do fluido  $\rho$  em (42), determinando-se o valor da tensão de arrastamento  $\tau_o$  pretendido.

Em cada ponto a tensão de arrastamento corresponde ao produto de  $\tau_o$  determinado pela velocidade  $u$ , nesse ponto, pelo perímetro molhado estabelecido pela área de influência desse mesmo ponto.

Todos os valores de velocidades determinadas experimentalmente bem como os parâmetros descritos anteriormente estão nos Quadro 4 e Quadro 5.

**Quadro 4 – Cálculo das Tensões de arrastamento dadas por Wu e Rajaratman (2000)**

Tensões de arrastamento dadas por Wu e Rajaratman (2000)							
Posição do Pitot	Velocidade no fundo	Distância	$A$	$b$	$A$	$R_0$	$R_s$
$Y$ (cm)	(m/s)	(m)					
73	0,120	0,08	8,30	19,500	-3,224	688,68	131,83
75	0,137					787,90	151,37
78	0,153					879,26	169,37
80	0,149					860,29	165,63
82	0,150					861,31	165,83
85	0,144					826,92	159,06
90	0,167					964,62	186,18
95	0,163					938,12	180,96
100	0,159					913,84	176,18
105	0,167					960,64	185,40
110	0,145					833,94	160,44
115	0,140					806,00	154,94
118	0,159					917,32	176,87
120	0,140					806,68	155,07
122	0,143					825,00	158,68
125	0,118					679,60	130,04
127	0,129					740,31	142,00

**Quadro 5 – Tensões de arrastamento dadas por Wu e Rajaratman (2000) para  $a$  e  $b$  determinados a partir dos valores de  $R_s$  determinados**

Tensões de arrastamento dadas por Wu e Rajaratman (2000)								
Posição do Pitot	$a$	$b$	$R_s$	$u^*$	$\tau_0$	Distância horizontal	$P_{\text{molhado}}$	$\tau_0 Y$
$Y$ (cm)					(Pa)	(m)	(m)	
73	8,50	0	130,52	0,023	0,513	0,03	0,04	0,023
75			149,33	0,026	0,672	0,03	0,04	0,024
78			166,65	0,029	0,837	0,04	0,05	0,041
80			163,05	0,028	0,801	0,01	0,01	0,011
82			163,24	0,028	0,803	0,03	0,03	0,020
85			156,72	0,027	0,740	0,04	0,04	0,030
90			182,82	0,032	1,007	0,05	0,05	0,050
95			177,80	0,031	0,953	0,05	0,05	0,048
100			173,20	0,030	0,904	0,05	0,05	0,045
105			182,07	0,032	0,999	0,05	0,05	0,050
110			158,06	0,027	0,753	0,05	0,05	0,038
115			152,76	0,027	0,703	0,04	0,04	0,028
118			173,86	0,030	0,911	0,03	0,03	0,023
120			152,89	0,027	0,704	0,01	0,01	0,007
122			156,36	0,027	0,737	0,04	0,04	0,026
125			128,80	0,022	0,500	0,03	0,03	0,012
127			140,31	0,024	0,593	0,03	0,03	0,019

Conseguiu verificar-se o erro da medição experimental de velocidades  $u_0$  aplicadas neste método de determinação do valor da tensão de arrastamento  $\tau_0$ , pela Equação de Conservação da quantidade de movimento (48), sejam  $P$  o perímetro molhado,  $A$  a área da secção e  $\gamma = 9800$ , conforme o Quadro 6.

$$\tau_0 P = Ai\gamma \quad (48)$$

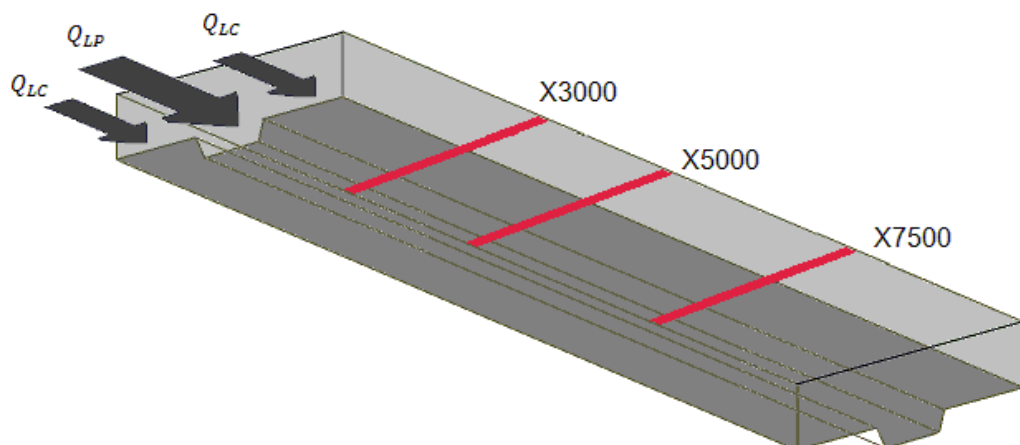
**Quadro 6 – Erro da medição experimental de velocidades**

Valores Experimentais	Valores Teóricos	Erro
$\tau_0 P$	$Ai\gamma$	%
0,4947	0,532435176	7

### 3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.4.1. Considerações iniciais

A avaliação e relação, elaboradas com base na evolução ao longo do canal com escoamento em regime uniforme, dos perfis de velocidades e tensões junto ao fundo implicaram a definição prévia das secções a medir, dada a morosidade e o tempo disponível para a realização de todos os ensaios pretendidos. A escolha das secções implica a compreensão dos fenómenos que ocorrem em canais de secção composta, extrapolados para o canal experimental de dimensões restritas tendo em atenção o facto de o escoamento demorar a estabilizar. Relações podem ser estabelecidas dos dados retirados destas secções, averiguando eventuais transferências de massa entre subsecções. Assim escolheram-se secções (*cf.* Figura 37) distribuídas pelo canal sendo a primeira mais a montante, a 3 m do início do canal (X 3000), onde se prevê que o escoamento esteja estabilizado após a entrada no canal. A segunda é a 5 m do início do canal (X 5000) e a última a 7,5 m do início do canal.



**Figura 37 – Esquematização das secções do canal estudadas**

O registo das velocidades ao longo das secções em estudo foi elaborado utilizando uma malha de medição pré-estabelecida. Em cada secção foram medidos valores de velocidades em 37 posições verticais (cota  $Y$ ), dentro das quais foram medidos em altura (cota  $Z$ ) 7 pontos no leito principal e 5 pontos nos leitos de cheia, perfazendo 215 registos de velocidade por secção. Os espaçamentos definidos para as posições verticais foram de uma forma geral, de 5 cm no leito principal e leitos de cheia, 2 cm na interface, 3 cm na zona

de transição da interface para os leitos de cheia e 10 cm nos leitos de cheia junto às paredes do canal. A distribuição de posições na cota  $Z$  foi feita para diferentes percentagens de altura de água desde a posição a 80% de altura de água dos LC, até à posição zero ( $u_{fundo}$ ) a 0,0016 m do fundo, equivalente a metade do diâmetro do tubo de Pitot (*cf.* Quadro 3).

As velocidades médias em profundidade para cada posição vertical foram obtidas através das expressões (49) e (50) para leito de cheia e principal respectivamente, com base nas medições feitas segundo a cota  $Z$  da posição vertical relativa.

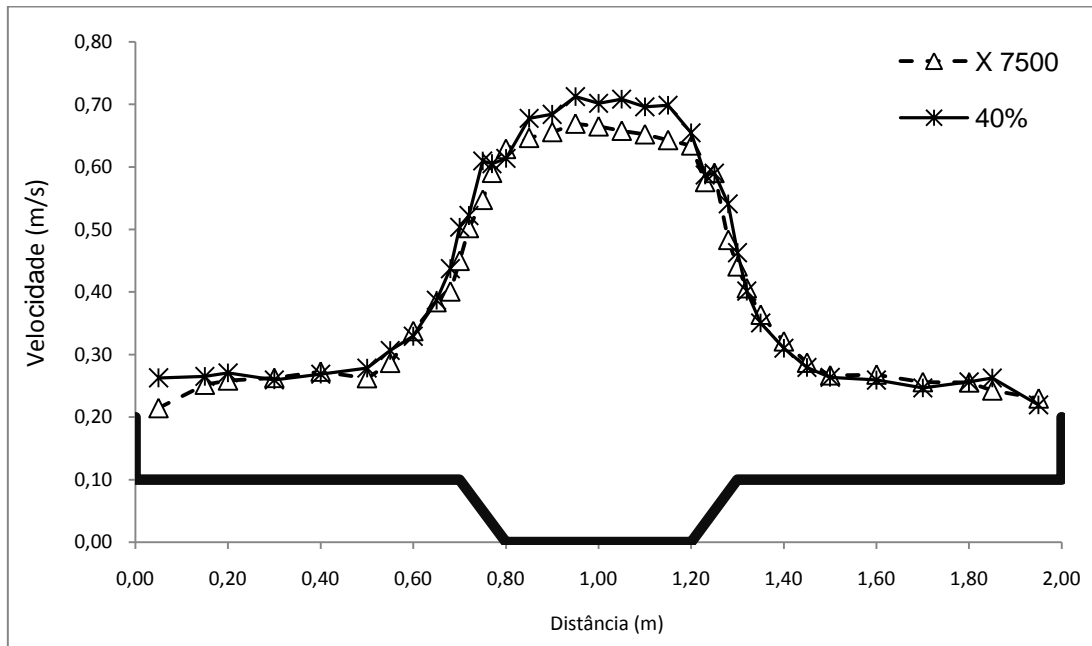
$$u_{LC}^{méd} = (7,5u_{10\%} + 15u_{20\%} + 20u_{40\%} + 20u_{60\%} + 30u_{80\%}) / 100 \quad (49)$$

$$u_{LP}^{méd} = (2,5u_{fundo} + 10u_{10\%} + 15u_{20\%} + 20u_{40\%} + 20u_{60\%} + 30u_{80\%}) / 100 \quad (50)$$

Com  $u_{\#\%}$  a velocidade medida a uma altura correspondente a  $\#\%$  da altura do escoamento,  $u_{LP}^{méd}$  e  $u_{LC}^{méd}$  as velocidades médias no leito principal e leito de cheia respectivamente.

Para a calibração das expressões (49) e (50) foram elaborados perfis verticais de velocidade em 18 pontos. As velocidades médias calculadas através destes foram comparadas com várias equações assumindo que se conheciam os valores de 5 ou 6 pontos, sendo os melhores resultados os que foram obtidos com as expressões (49) e (50). É sabido que estes valores de velocidade média estão bastante próximos dos valores de velocidades medidos a 40% da altura do escoamento (*cf.* Figura 38), não tendo sido utilizada esta aproximação válida apenas para escoamentos bidimensionais (*cf.* Figura 4).





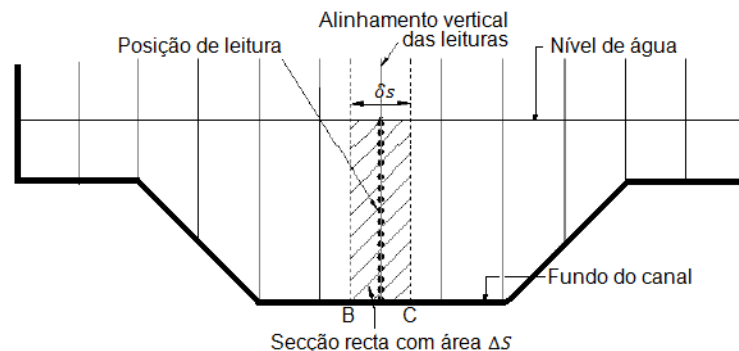
**Figura 38 – Comparação do perfil de velocidades medido a 40% da altura de escoamento e o perfil de velocidades médias –  $h_r=0,15$  em fundo liso**

Na integração de velocidades e cálculo do caudal total que atravessa toda a secção foi utilizado o mesmo procedimento de Pinto (2010) com base no princípio de que num dado sistema não há destruição nem criação de matéria, existindo sim a conservação desta. Assim a massa de fluido que entra no canal terá de ser igual à massa de fluido que sai do mesmo. Sendo  $\delta s$  um comprimento do canal, suficientemente pequeno, em que a variação  $\Delta S$  da área da secção recta seja desprezável entre secções rectas B e C, geralmente em pontos intermédios da malha considerada (*cf.* Figura 39), a porção de fluido nela contida é  $(\Delta S)\delta s$ . Este volume de fluido em C passaria em determinado intervalo de tempo  $\delta t$  a uma taxa de  $(\Delta S)\delta s / \delta t$ . Tem-se então pelo quociente  $\delta s / \delta t$  a velocidade linear  $u$  no ponto estudado, com o caudal volumétrico que passa nesse plano  $(\Delta S)u$ .

O caudal volumétrico  $Q$  obtém-se assim conforme a expressão (51) multiplicando a velocidade média  $\bar{u}$  de cada posição da malha de medições pela sua área  $S$ .

$$Q = \int u dS = \bar{u} S \quad (51)$$

Através do somatório de todos os caudais de cada área de uma secção, obtém-se o caudal total atravessado por essa secção (Massey, 2002).



**Figura 39 – Esquemática da integração realizada para cálculo de caudal escoado em determinada**

### 3.4.2. Obtenção do regime uniforme

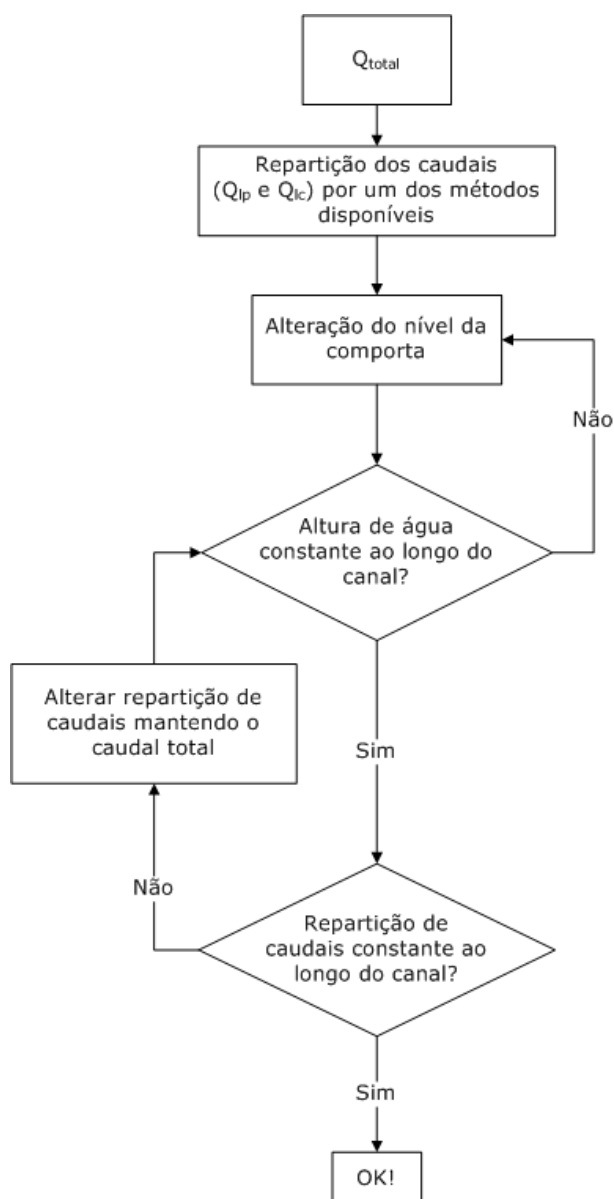
Os ensaios realizados no âmbito da presente dissertação foram elaborados em condição de escoamento de regime uniforme, pretendendo que as velocidades, alturas de água, caudais e respectivas distribuições fossem constantes nas secções do canal estudadas. Para que estes parâmetros não variassem ao longo das secções do canal, procedeu-se no início das medições à calibração do canal, cujo procedimento se encontra esquematizado na Figura 40.

Os caudais iniciais impostos a montante repartidos separadamente para o leito principal e leitos de cheia foram calculados pelo método de divisão do canal *WDCM* desenvolvido por Lambert e Myers (1998).

Após a estabilização dos caudais impostos no canal a montante, foram medidos os níveis de água através dos hidrómetros ligados ao fundo do canal, a montante e a jusante. A regulação da comporta foi feita numa primeira fase até estes níveis se igualarem. Depois de atingido este equilíbrio foram medidas alturas de água com recurso ao hidrómetro instalado no carro de medições. Estas medições tiradas nos  $LC_{esq}$ ,  $LC_{dir}$  e  $LP$  em  $X\ 4000$  e  $X\ 8000$ , com sucessivas mudanças de posição da comporta principal ou somente das comportas dos  $LC$ .

Atingido o equilíbrio, fez-se a medição das velocidades e fazendo uma integração de velocidades pela sua área de influência, foram retirados os novos caudais de imposição a

montante. O processo de medição das alturas de água e integração das velocidades medidas repetiu-se até existir um equilíbrio na repartição de caudais ao longo do canal.



**Figura 40 – Procedimento de Calibração do canal para Regime Uniforme (Teixeira, 2011)**

### 3.4.3. Ensaios realizados

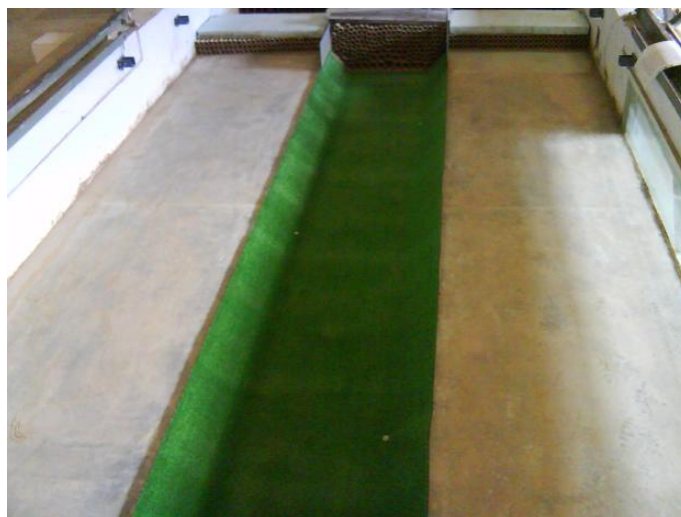
No âmbito desta dissertação foram elaborados ensaios experimentais em regime uniforme no canal de secção composta descrito no início deste capítulo. Numa primeira fase

foram realizados ensaios com o fundo do canal em betonilha de cimento liso para as alturas relativas  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$  (cf. Figura 41).



**Figura 41 – Fundo sem rugosidade**

Na segunda fase do trabalho foram colocados panos de relva sintética no leito principal (cf. Figura 42) para a realização de ensaios de caracterização da rugosidade e teste do equipamento conforme apresentado no subcapítulo 4.1 da presente dissertação.



**Figura 42 – Fundo com rugosidade apenas no leito principal**

Os panos de relva sintética aplicados no leito principal foram posteriormente arrancados e colocados nos leitos de cheia (*cf.* Figura 43), repondo o fundo de cimento liso ao leito principal. O canal adquiriu assim as características pretendidas para a realização de ensaios em canal de secção composta com leitos de cheia rugosos.

Adiante no capítulo 4 são apresentados todos os cálculos que permitiram a caracterização da rugosidade imposta pela relva sintética aos leitos de cheia do canal. Nestas condições foram elaborados ensaios para as alturas relativas  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$ .



**Figura 43 – Fundo com rugosidade apenas nos leitos de cheia**

No Quadro 7 encontram-se apresentados todos os ensaios realizados, nas correspondentes alturas relativas, secções do canal e rugosidade.

**Quadro 7 – Quadro resumo de Ensaio realizados**

altura relativa	com LC	secção medida			Escoamento só LP	
0,15	Liso	X 3000	X 5000	X 7500	X 5000	
	Rugoso	X 3000	X 5000	X 7500	X 5000	
0,3	Liso	X 3000	X 5000	X 7500	X 5000	
	Rugoso	X 3000	X 5000	X 7500	X 5000	
altura relativa	perfil vertical					
0,15	X 3000	X 5000	-	X 7500	-	-
	X 3000	X 5000	X 7000	X 7500	X 8000	X 8500
0,3	X 3000	X 5000	-	X 7500	-	-
	X 3000	X 5000	X 7000	X 7500	X 8000	X 8500

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE

#### 4.1.1. Considerações iniciais

Para a caracterização das rugosidades para os fundos em cimento liso e em relva sintética recorreu-se à expressão de Manning-Strickler (52) para determinar o coeficiente de rugosidade de Strickler  $K_s$ , onde Manning  $n = 1/K_s$ , através de várias medições de caudal ( $Q$ ) e respectivas alturas uniformes de água ( $h$ ), utilizando para isso apenas o leito principal, ou seja canal com secção simples.

$$\bar{u} = K_s R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (52)$$

Conhecida a velocidade média do escoamento,  $\bar{u}$ , o declive do leito,  $S_0$ , e o raio hidráulico,  $R$ , igual à área sobre o perímetro molhado, correspondentes a um determinado caudal imposto no leito principal com altura de água conhecida, pode determinar-se o coeficiente  $K_s$ .

A pendente da linha de água é o valor médio dos declives dados pelas alturas medidas ao longo do canal, de 1 m em 1 m, sendo esse valor igual a 0,0011 m/m.

Definido o coeficiente de rugosidade de Strickler  $K_s$  há ainda que determinar a rugosidade absoluta equivalente de Nikuradse ( $k_s$ ), ou parâmetro de altura das rugosidades de fronteira, que pode ser determinado com base na equação de Colebrook-White (53) (Cardoso, 1998), sendo  $f$  o factor de resistência adimensional de Darcy-Weisbach (Yen, 2002) calculado através da expressão (54) conhecido o coeficiente de Manning ( $n$ ).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{a_f R} + \frac{b_f}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (53)$$

$$f = 8g \sqrt{\frac{R^{1/6}}{n}} \quad (54)$$

Na equação de Colebrook-White (53) definem-se com base na forma da secção transversal do escoamento, os parâmetros  $a_f$  e  $b_f$ , que para um canal muito largo tomam valores  $a_f = 12$  e  $b_f = 3,4$ .

Encontram-se ainda várias expressões que relacionam no caso de leitos em fundo liso o coeficiente de Manning ( $n$ ) com a rugosidade absoluta ( $k_s$ ), tais como as apresentadas por:

$$k_s = \frac{12,2R}{10^{\left(\frac{0,0457R^{1/6}}{n}\right)}} \quad \text{Chow, 1959 (55)}$$

$$k_s = \left(\frac{n}{0,0391}\right)^6 \quad \text{Sturm, 2001 (56)}$$

$$k_s = \frac{14,85R}{10^{\left(\frac{0,0564R^{1/6}}{n}\right)}} \quad \text{Massey, 2002 (57)}$$

#### 4.1.2. Cimento alisado

O procedimento utilizado para o cálculo da rugosidade consistiu na imposição de um caudal conhecido no leito principal através da válvula de seccionamento e do caudalímetro instalados a montante, caudal este inicialmente baixo correspondendo a uma altura de água igualmente baixa. Com as descargas de fundo fechadas a montante e com o auxílio de hidrómetros instalados nas posições X 4500 e X 6500 do canal, foram medidas e registadas as alturas de água nessas posições.

O regime uniforme implica a conservação da altura de água ao longo do canal, pelo que com a leitura das alturas de água nos hidrómetros conseguiu saber-se como deveria ser regulada a comporta a jusante para após a estabilização do escoamento, serem de novo registadas as alturas de água, executando sucessivos ajustes na comporta e registo de alturas até estas serem iguais, chegando-se com isso ao regime uniforme.



Este procedimento foi repetido várias vezes com caudais e alturas de água distribuídas conforme o Quadro 8, sendo  $Q$  o caudal de leitura no caudalímetro e  $Q_0$  (l/s) o caudal de cálculo, caudal que efectivamente entra no canal, obtido de acordo com os Quadros 1 e 2.

Com todos os valores do coeficiente de rugosidade determinados para cada caudal imposto, determinou-se o valor médio desse parâmetro, tendo resultado num valor médio de  $K_s = 108 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  valor ligeiramente superior a  $K_s = 100 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  tabelado para canais de fundo liso de cimento (Lencastre, 1996).

Definido este parâmetro, para cada caudal imposto ao escoamento, foi determinada ainda em fundo liso a rugosidade absoluta ( $k_s$ ) indicada do mesmo modo no Quadro 8.

Ainda no Quadro 8 são apresentados os valores médios da rugosidade absoluta obtidos pelas formulações de Chow (1959), de Sturm (2001) e de Massey (2002) determinados através das expressões (55) (56) e (57) respectivamente. Verifica-se que apenas os valores médios de rugosidade obtidos pelas expressões (56) e (57) fornecem valores próximos entre si. Pode adoptar-se para o caso do fundo do canal em cimento liso, uma rugosidade absoluta de  $k_s = 0,00018 \text{ m}$ .

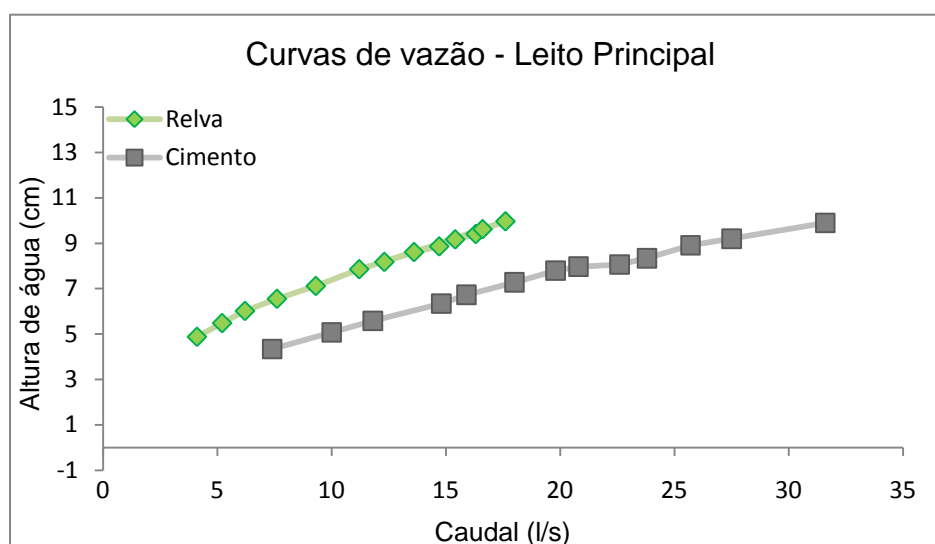
Quadro 8 – Valores de  $K_s$  e  $k_s$  relativos aos diferentes caudais impostos em fundo liso

						Manning	Weisbach	Colebrook-White	$k_s$		
$Q$ (l/s)	$Q_0$ (l/s)	$h$ (m)	$S$ (m <sup>2</sup> )	$P$ (m)	$K_s$ (m <sup>1/3</sup> /s)	$n$ (m <sup>-1/3</sup> s)	$f$	$k_s$ (mm)	Sturm (mm)	Chow (mm)	Massey (mm)
7,60	7,60	0,044	0,019	0,524	102,75	0,0097	0,0120	0,199	0,24	0,88	0,25
9,62	9,62	0,048	0,022	0,537	110,34	0,0091	0,0119	0,110	0,16	0,55	0,14
11,43	11,53	0,054	0,025	0,553	108,94	0,0092	0,0119	0, 117	0,17	0,59	0,15
13,35	13,45	0,058	0,027	0,565	112,63	0,0089	0,0119	0, 085	0,14	0,46	0,11
15,27	15,37	0,066	0,031	0,587	104,08	0,0096	0,0120	0, 160	0,22	0,79	0,2
17,18	17,28	0,070	0,033	0,597	107,06	0,0093	0,0119	0, 124	0,19	0,64	0,15
19,10	19,20	0,076	0,036	0,614	103,27	0,0097	0,0120	0, 163	0,23	0,82	0,2
21,02	21,12	0,078	0,038	0,622	106,99	0,0094	0,0119	0, 120	0,19	0,64	0,15
22,93	23,03	0,081	0,039	0,630	109,32	0,0092	0,0121	0, 098	0,16	0,54	0,12
24,85	24,95	0,085	0,041	0,641	109,83	0,0091	0,0120	0, 092	0,16	0,52	0,11
26,77	26,87	0,088	0,043	0,650	111,01	0,0090	0,0120	0, 082	0,15	0,48	0,1
28,68	28,78	0,093	0,046	0,662	109,81	0,0091	0,0120	0, 089	0,16	0,51	0,11
30,60	30,70	0,097	0,048	0,674	108,56	0,0092	0,0120	0, 097	0,17	0,56	0,12
								Valor médio	Valores médios		
								<b>0,118</b>	0,18	0,61	0,15

#### 4.1.3. Relva artificial

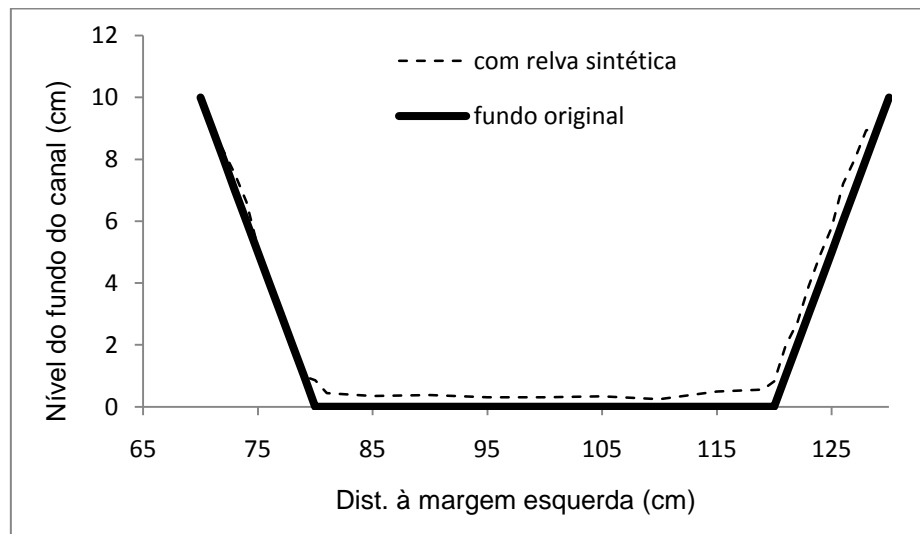
Para a caracterização da rugosidade adquirida pelos leitos de cheia com fundo de relva sintética, foram instalados panos de relva no leito principal e foi seguido o procedimento efectuado para a caracterização da rugosidade em fundo de cimento liso anteriormente descrito, com caudais e alturas de água distribuídas conforme o Quadro 9.

Na Figura 44 apresenta-se a curva de vazão para o escoamento em secção simples a cinzento correspondente a fundo de cimento liso, e a verde para fundo com relva sintética. Esta curva apresenta a razão entre o caudal escoado em regime uniforme e a altura de água para o mesmo troço do canal.



**Figura 44 – Curvas de Vazão – Fundos Liso, Relva no Leito Principal**

Com a aplicação dos panos de relva sintética no leito principal a área de escoamento foi reduzida. A diferença de área resultante desta aplicação (*cf.* Figura 42) foi tida em conta durante os ensaios de caracterização da rugosidade da relva sintética. Para a determinar foi feito um levantamento da secção com o auxílio do hidrómetro, com o leito principal do canal cheio de água e a comporta a jusante fechada, estando a diferença apresentada representativamente na Figura 45.



**Figura 45 – Alteração da área de escoamento com a colocação da relva sintética no leito principal**

Do mesmo modo, procedeu-se à determinação do parâmetro  $K_s$  ( $m^{1/3}/s$ ) para a relva sintética através da média aritmética dos valores de coeficiente de rugosidade obtidos para os diferentes caudais impostos, resultando num valor médio de  $K_s = 55 m^{1/3}/s$ , valor ligeiramente inferior ao  $K_s = 80 m^{1/3}/s$  tabelado.

Definido o coeficiente de rugosidade de Strickler  $K_s$  para cada caudal imposto ao escoamento, (cf. Quadro 9) determinou-se a rugosidade absoluta ( $k_s$ ) correspondendo a fundo com relva sintética. Pode assim adoptar um valor de  $k_s = 0,00617 m$  para a rugosidade absoluta da relva sintética.

Quadro 9 – Valores de  $K_s$  e  $k_s$  relativos aos diferentes caudais impostos em fundo com relva sintética

$Q$ (l/s)	$Q_0$ (l/s)	$h$ (m)	$S$ (m <sup>2</sup> )	$P$ (m)	$K_s$ (m <sup>1/3</sup> /s)	Manning	Weisbach	Colebrook-White
						$n$ (m <sup>-1/3</sup> s)	$f$	$k_s$ (mm)
3,20	3,20	0,044	0,019	0,523	43,76	0,2299	2,8145	17,380
4,10	4,10	0,049	0,022	0,538	46,33	0,2051	2,0632	14,842
5,20	5,20	0,055	0,025	0,555	48,28	0,1825	1,5084	13,213
6,20	6,20	0,060	0,028	0,570	49,21	0,1663	1,1807	12,599
7,60	7,60	0,066	0,030	0,585	52,24	0,1527	0,9304	10,125
9,30	9,30	0,071	0,034	0,601	55,57	0,1405	0,7372	7,892
11,10	11,20	0,079	0,038	0,622	56,57	0,1273	0,5702	7,405
12,20	12,30	0,082	0,039	0,631	58,04	0,1223	0,5101	6,609
13,50	13,60	0,086	0,042	0,644	58,74	0,1161	0,4446	6,286
14,60	14,70	0,089	0,043	0,651	60,46	0,1129	0,4090	5,475
15,30	15,40	0,092	0,045	0,659	59,71	0,1091	0,3759	5,847
16,20	16,30	0,094	0,046	0,666	60,52	0,1063	0,3506	5,485
16,50	16,60	0,096	0,048	0,672	59,28	0,1040	0,3331	6,096
17,50	17,60	0,100	0,050	0,682	59,15	0,1004	0,3044	6,187
								Valor adoptado
								<b>6,174</b>

#### 4.2. REGIME UNIFORME COM LEITOS DE CHEIA LISOS – $h_r=0,15$ e $h_r=0,3$

A situação de  $h_r=0,15$  para leitos de cheia lisos foi analisada com caudais de 38,2 l/s para o leito principal e 6,6 l/s para os leitos de cheia, depois do canal calibrado através do processo descrito no subcapítulo 3.4.2, registando as medições de alturas de água indicadas no Quadro 10. Estes caudais foram obtidos através da integração das velocidades medidas pela sua área de influência, onde no escoamento estavam impostos os caudais anteriormente determinados pelo WDCM (Lambert e Myers, 1998). No Quadro 11 estão indicados estes caudais e os respectivos factores de correcção, que representam o rácio entre os caudais impostos ao escoamento, medidos nos caudalímetros, e os caudais obtidos através da integração das velocidades. Estes factores de correcção são utilizados para corrigir todos os valores de velocidade de modo a garantir a conservação da massa. Na Figura 46 encontra-se apresentada a evolução longitudinal do rácio entre os caudais dos leitos de cheia e os caudais totais nas secções em estudo, que permite verificar que ao longo do canal aquele rácio permanece praticamente inalterado, sendo por isso desprezáveis as transferências de massa entre leitos.

**Quadro 10 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme –  $h_r=0,15$  em fundo liso**

Posição	X (m)	3000			7500		
	Y (cm)	35	100	165	35	100	165
Altura medida (cm)		1,79	11,79	1,76	1,76	11,76	1,70

**Quadro 11 – Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo liso com  $h_r=0,15$**

	Caudais impostos	X 3000		X 5000		X 7500	
$Q_{lc}$ (l/s)	6,6	6,33	96,4%	6,60	100,6%	6,63	101,0%
$Q_{lp}$ (l/s)	38,2	37,75	98,7%	38,08	99,6%	38,11	99,7%
	Factor	1,016		1,003		1,001	
	$h_{LC}$ (m)	0,0172					

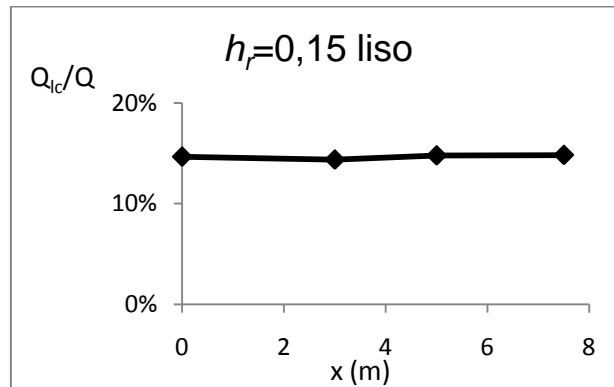
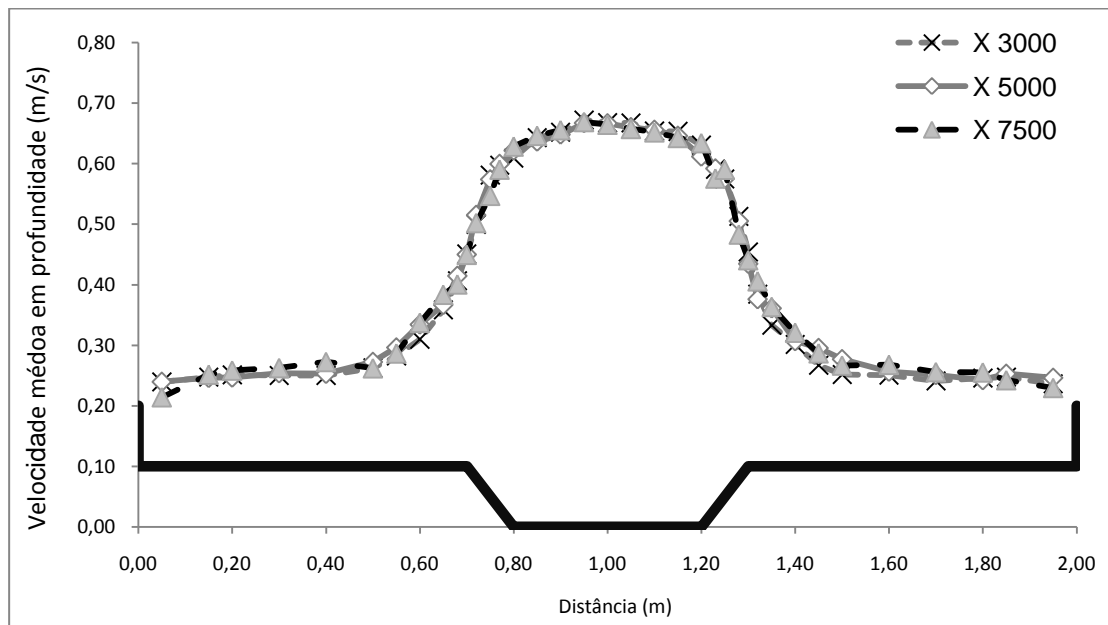


Figura 46 – Evolução longitudinal do rácio  $Q_{ic}/Q$  -  $h_r=0,15$  em fundo liso (%)

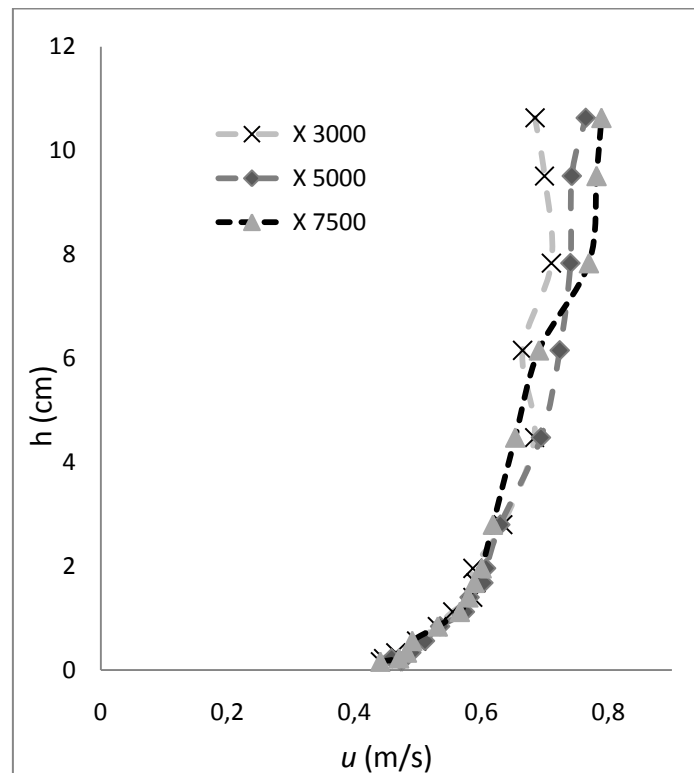
Na Figura 47 estão apresentadas as distribuições transversais das velocidades médias em profundidade determinadas conforme as expressões (49) e (50) anteriormente apresentadas, para as três secções do canal analisados. Os perfis apresentados demonstram que as secções em estudo têm valores da mesma ordem de grandeza e com um padrão semelhante, que se pretendia, provando a obtenção de regime uniforme para esta altura relativa. A existência de alguns pontos que se encontram fora do padrão pode explicar-se pela precisão do aparelho de medição ou por alguma perturbação no sistema durante a medição. É visível o efeito parede junto às paredes laterais do canal onde há uma redução das velocidades devido ao atrito existente no contacto do escoamento com as paredes do canal. No leito de cheia a altura de escoamento é menor do que no leito principal, e com elas as velocidades também. É assim visível um aumento da velocidade do escoamento na passagem do leito de cheia para o leito principal. As maiores velocidades ocorrem no centro do leito principal.



**Figura 47 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade -  $h_f=0,15$  em fundo liso**

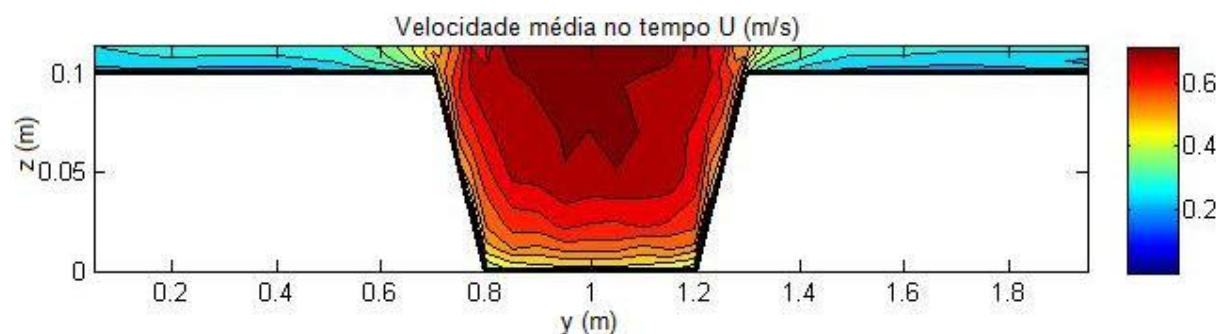
Foram tirados perfis verticais de velocidade (cf. Figura 48) no centro do canal (cota  $Y=100$  cm) com base em 14 pontos medidos em altura para cada perfil, de modo a poder fazer-se a comparação das respectivas velocidades. É visível que os perfis verticais de velocidade tendem para uma geometria e posição constantes, apresentando pequenas diferenças da secção X 3000 para a secção X 5000 apresentando esta última um perfil quase coincidente com o da secção X 7500.



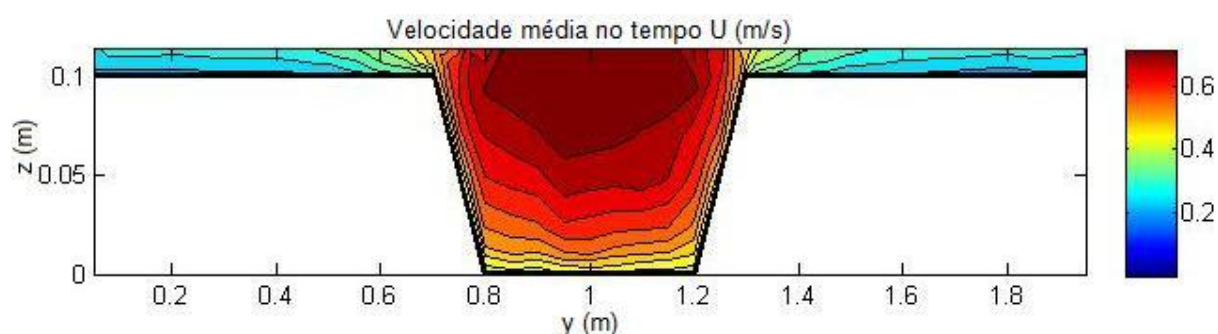


**Figura 48 – Perfis vertical velocidades -  $h_r=0,15$  em fundo liso**

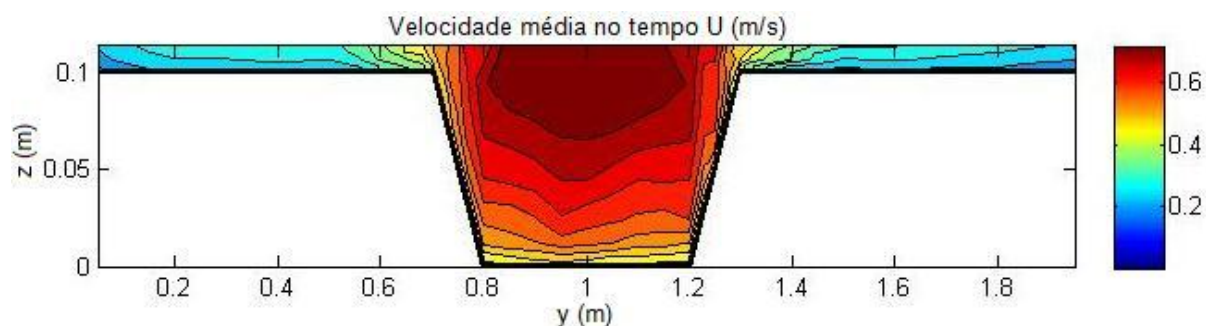
As velocidades medidas permitiram com recurso à utilização de isolinhas, a elaboração de perfis de distribuição das velocidades médias ao longo do tempo. Nas Figuras 49, 50 e 51 são apresentadas as distribuições de velocidade das secções em estudo de montante para jusante do canal. Nos gráficos, as cores mais escuras representam velocidades mais baixas e as cores mais claras representam as velocidades mais altas. Pode notar-se de um modo geral uma homogeneidade na distribuição das velocidades ao longo do canal. As velocidades mais altas no centro do leito principal tentam a uniformizar-se com a passagem da secção X 3000 para a secção X 5000, tendo uma variação pouco significativa desta secção para X 7500, onde o escoamento já se encontra em equilíbrio. As velocidades dos leitos de cheia parecem permanecer inalteradas de umas secções para as outras, mantendo velocidades sempre baixas quando comparadas com as dos leito principal. Na zona da interface do leito principal com o leito de cheia, ao longo das secções as velocidades tendem a baixar, puxando os limites das velocidades mais altas do leito principal cada vez mais para o centro do canal.



**Figura 49 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000  $h_r=0,15$  em fundo liso**



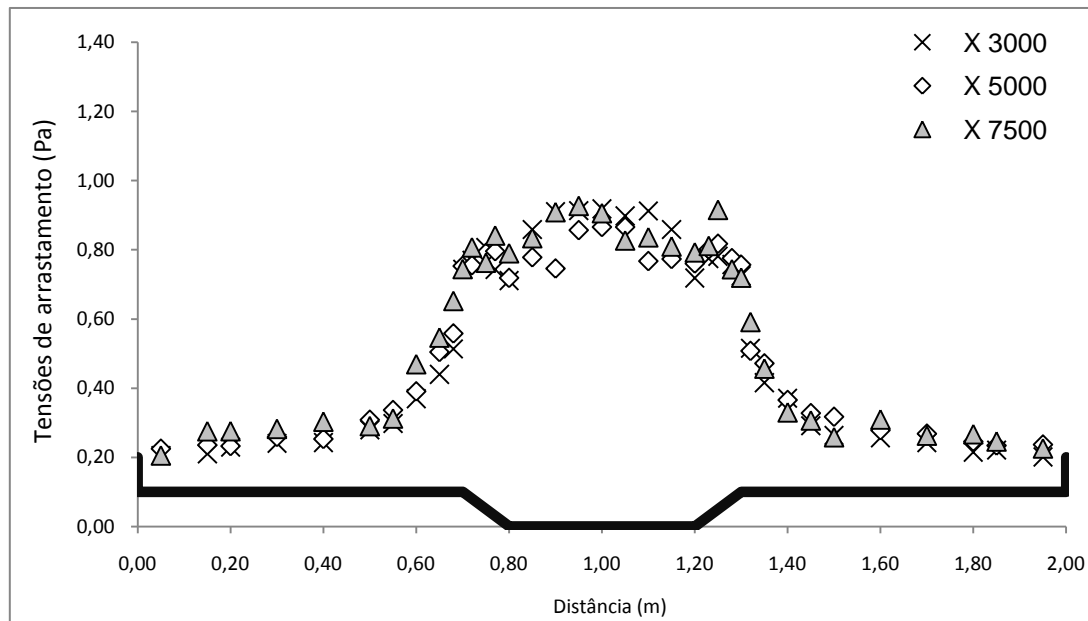
**Figura 50 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000  $h_r=0,15$  em fundo liso**



**Figura 51 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500  $h_r=0,15$  em fundo liso**

As tensões de arrastamento junto ao fundo do canal foram determinadas conforme anteriormente descrito no subcapítulo 3.3 e são apresentadas na Figura 52 através dos perfis ao longo da secção transversal para as diferentes secções em estudo.

Tal como verificado para a distribuição transversal das velocidades médias em profundidade também a distribuição transversal das tensões de arrastamento em secção transversal exhibe maiores tensões no leito principal e menores tensões nos leitos de cheia.



**Figura 52 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 –  $h_r=0,15$  em fundo liso**

Na passagem dos leitos de cheia para o leito principal, surge um aumento brusco de tensões seguido de uma diminuição sensivelmente a meio da interface, voltando a aumentar até ao centro do canal. As tensões no leito principal para a secção X 7500 tomam valores, de uma forma geral, superiores aos medidos nas mesmas posições nas secções mais a montante.

O mesmo estudo e análise foram elaborados no caso de escoamento em regime uniforme com leitos de cheia lisos, para uma altura relativa  $h_r=0,30$ . Os ensaios foram efectuados depois do canal calibrado através do processo anteriormente descrito no subcapítulo 3.4.2, registando as medições de alturas de água indicadas no Quadro 12. Os caudais impostos ao escoamento para a realização dos ensaios foram de 54,2 l/s para o leito principal e 26,4 l/s para os leitos de cheia. O rácio entre os caudais impostos ao escoamento (medidos nos caudalímetros) e os caudais obtidos através da integração das

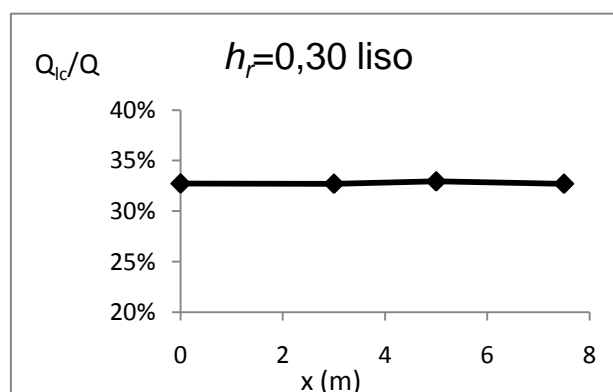
velocidades medidas encontram-se apresentados no Quadro 13. Na Figura 53 apresenta-se a evolução longitudinal do rácio entre os caudais dos leitos de cheia e os caudais totais nas secções em estudo. Tal como ocorreu para  $h_r=0,15$  (cf. Figura 46), o rácio mantém-se constante, ou seja, ao longo do canal não existem transferências de massa significativas entre os leitos.

**Quadro 12 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme –  $h_r=0,30$  em fundo liso**

Posição	X (m)	3000			7500		
	Y (cm)	35	100	165	35	100	165
Altura medida (cm)		4,08	14,14	4,12	4,10	14,10	4,12

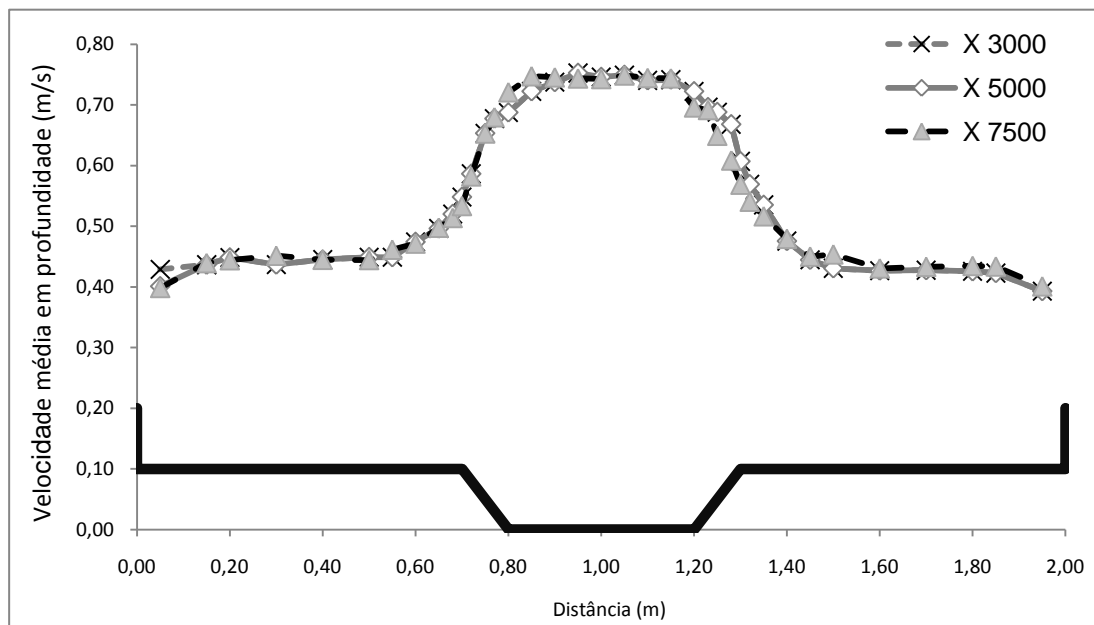
**Quadro 13 - Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo liso com  $h_r=0,30$**

	Caudais impostos	X 3000		X 5000		X 7500	
$Q_{lc}$ (l/s)	26,4	26,37	99,9%	26,57	100,7%	26,37	99,9%
$Q_{lp}$ (l/s)	54,2	54,25	100,0%	54,07	99,7%	54,25	100,0%
	Factor	1,00		1,00		1,00	
	$h_{lc}$ (m)	0,0422					



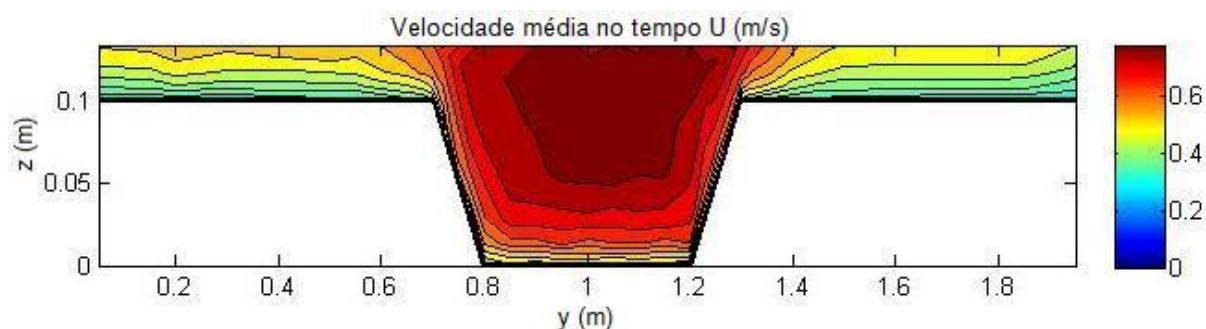
**Figura 53 – Evolução longitudinal do rácio  $Q_{lc}/Q$  -  $h_r=0,30$  em fundo liso (%)**

Na Figura 54 estão apresentadas as distribuições transversais das velocidades médias em profundidade determinadas conforme anteriormente apresentado. As três secções do canal foram analisadas e os perfis apresentados demonstram velocidades da mesma ordem de grandeza com padrão semelhante em todas as secções, confirmando que a calibração do canal para este caso gerou uma vez mais a obtenção de regime uniforme conforme se pretendia. É clara a descida de velocidades em todas as secções junto às paredes laterais, sendo nas secções X 5000 e X 7500 descidas com traçados perfeitamente coincidentes. As velocidades do escoamento no leito de cheia são menores do que no leito principal onde há maior altura de água, sendo as maiores velocidades no centro do leito principal.

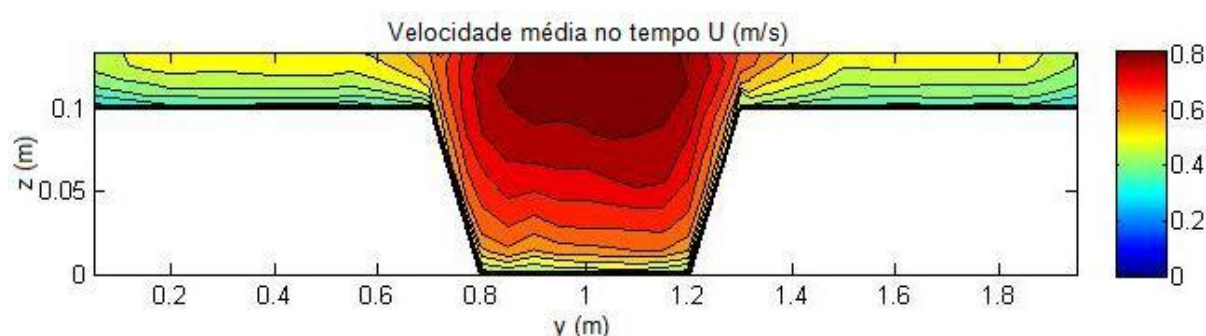


**Figura 54 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade -  $h_r=0,30$  em fundo liso**

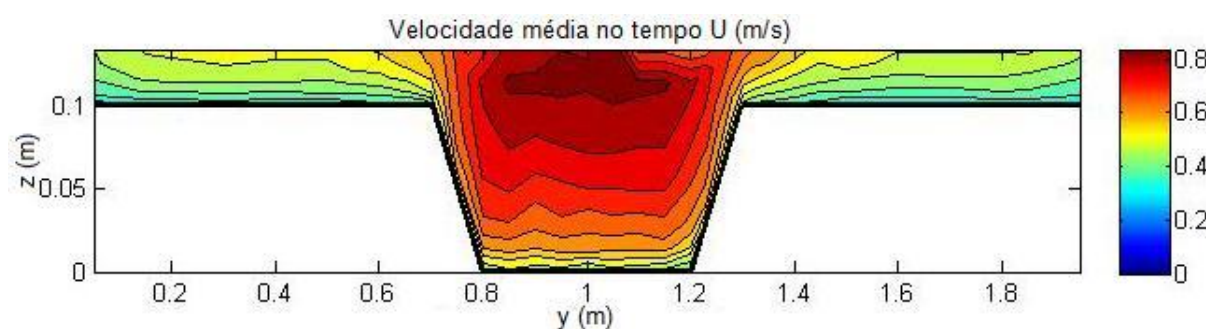
Nas Figuras 55, 56 e 57 apresentam-se as distribuições das velocidades no tempo das secções em estudo. É perceptível que as velocidades mais altas no centro do leito principal diminuem com a passagem da secção X 3000 para a secção X 5000, decrescendo ainda mais desta secção para X 7500. As velocidades dos leitos de cheia permaneceram sem alterações consideráveis mesmo na zona da interface do leito principal com o leito de cheia, onde ao longo das secções se pode considerar uma ligeira descida das velocidades.



**Figura 55 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000  $h_r=0,30$  em fundo liso**



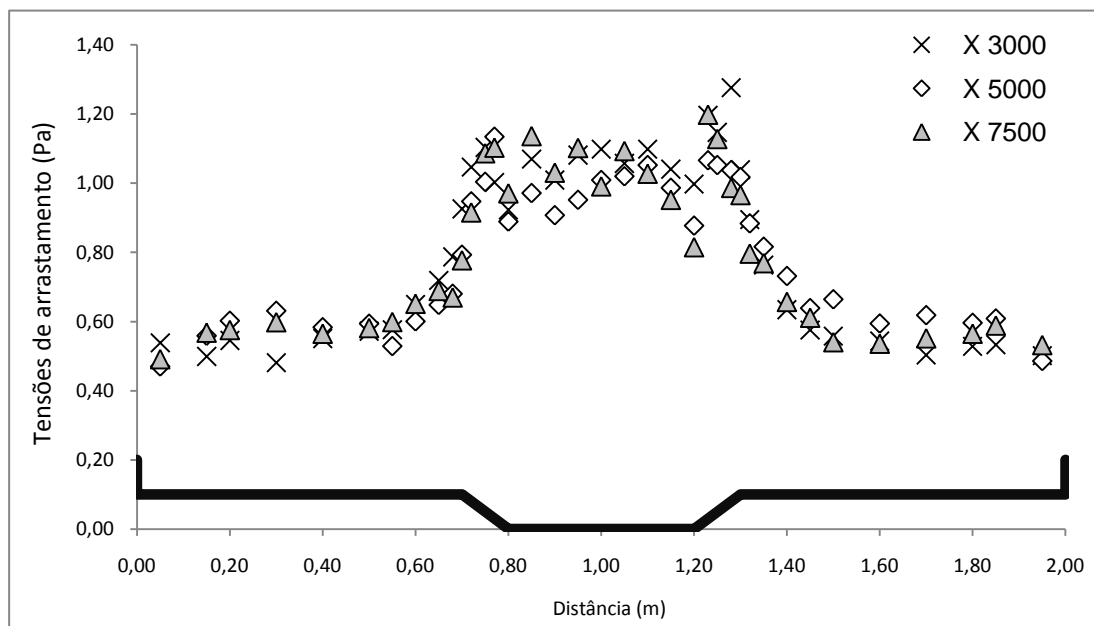
**Figura 56 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000  $h_r=0,30$  em fundo liso**



**Figura 57 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500  $h_r=0,30$  em fundo liso**

As distribuições transversais das tensões de arrastamento junto ao fundo do canal para as diferentes secções em estudo apresentam-se na Figura 58. Os perfis de tensões de arrastamento em secção transversal exibem menores tensões nos leitos de cheia crescendo para valores maiores de tensão com a proximidade às interfaces destes com o leito principal onde surge um aumento brusco de tensões seguido de uma pequena diminuição até aos

valores apresentados a meio do canal. As tensões para a secção X 3000 tomam valores ligeiramente mais baixos nos leitos de cheia do que as secções mais a jusante. É ainda visível um valor de tensão no início da interface do leito direito com o leito principal sem qualquer simetria com a interface esquerda, pelo que deverá ser explicado com algum erro experimental na sua medição.

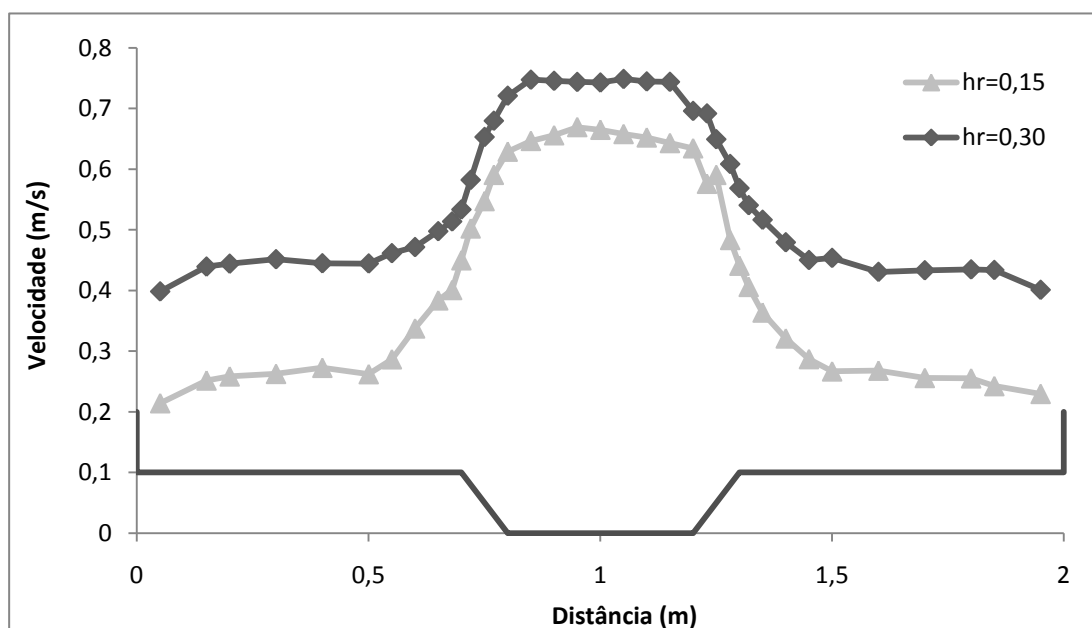


**Figura 58 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 –  $h_r=0,30$  em fundo liso**

Com a passagem do escoamento em regime uniforme com  $h_r=0,15$  para  $h_r=0,30$  verifica-se que a ordem de grandeza das velocidades aumenta de um modo geral para o leito principal e para os leitos de cheia. Sobrepondo os perfis de velocidade em secção transversal das secções X 7500 para ambas as alturas relativas, esse facto torna-se evidente (cf. Figura 59). As velocidades nos leitos de cheia apresentam um aumento maior do que as velocidades no leito principal. Constata-se que a diferença de velocidades entre os leitos diminui para a maior altura relativa, o que se deve traduzir numa diminuição das tensões tangenciais na interface, dado que devem ser proporcionais a  $\partial U_p / \partial y$ . Comparadas as isolinhas de velocidade em X 7500 para  $h_r=0,15$  (cf. Figura 51) e para  $h_r=0,30$  (cf. Figura 57) constata-se que a estrutura turbulenta parece ser diferente, pois para a maior altura relativa existe uma inflexão das isolinhas que se traduz na velocidade máxima ocorrer no leito principal numa secção abaixo da superfície livre. Este fenómeno é conhecido

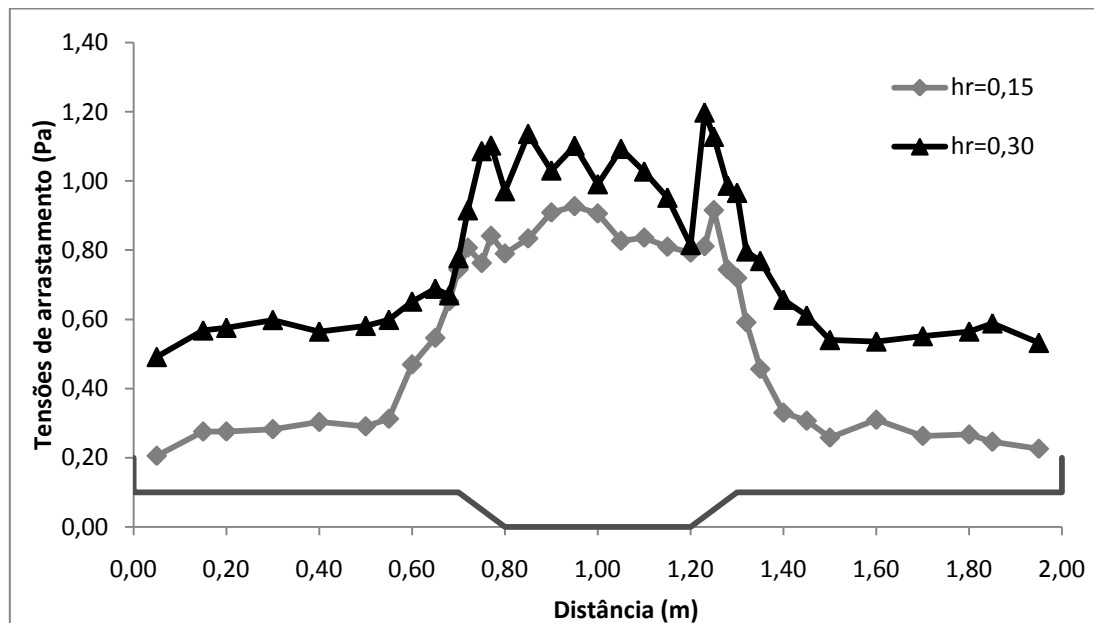
como “velocity deep” (cf. Nezu *et al.*, 1999) e indica a presença e influência de correntes secundárias.

Do mesmo modo pela Figura 60 verifica-se com o aumento da altura relativa, um aumento das tensões de arrastamento, sendo essa subida mais acentuada para os leitos de cheia. A escolha destas secções para comparação é a mais correcta por ser a secção mais a jusante, onde os fenómenos de interacção entre leitos já se desenvolveram até uma situação de “equilíbrio”.



**Figura 59 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade – comparação para X 7500 entre  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$  em fundo liso**





**Figura 60 – Perfis Distribuição transversal das tensões de arrastamento em fundo liso – comparação para X 7500 entre  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$**

#### **4.3. REGIME UNIFORME COM LEITOS DE CHEIA RUGOSOS – $h_r=0,15$ e $h_r=0,3$**

As distribuições de caudais para as diferentes alturas relativas em estudo foram uma vez mais determinadas através do método de divisão do canal *WDCM*. Seguindo o processo de calibração do canal para regime uniforme verificaram-se as alturas de água no canal (*cf.* Quadro 14). Os caudais impostos para a realização dos ensaios foram de 35,1 l/s no leito principal e 3,7 l/s nos leitos de cheia. O rácio entre os caudais impostos ao escoamento (medidos nos caudalímetros) e os caudais obtidos através da integração das velocidades medidas encontram-se apresentados no Quadro 15. Na Figura 61 apresenta-se a evolução longitudinal do rácio entre os caudais dos leitos de cheia e os caudais totais nas secções em estudo. O facto deste rácio se manter praticamente inalterado ao longo do canal indica a inexistência de transferências de massa entre os leitos.

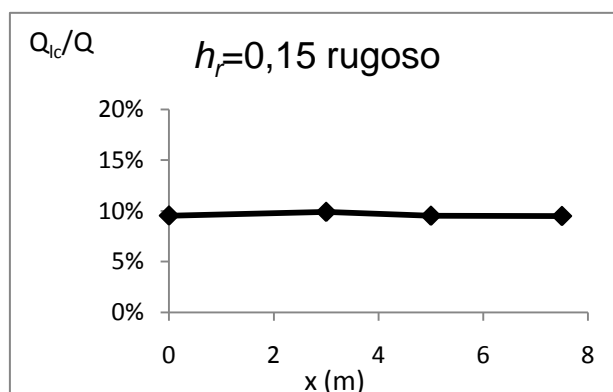
**Quadro 14 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme –  $h_r=0,15$  em fundo rugoso**

	Y (m)	X 4000	X 8000
		Alturas de água (cm)	
Leito de cheia esquerdo	0,15	1,89	1,95
	0,30	1,87	1,94
	0,50	2,01	1,9
	0,60	1,89	1,91
	0,68	1,91	1,92
Leito Principal*	0,85	11,93	11,99
	1,00	11,95	11,91
	1,15	11,94	11,91
Leito de cheia direito	1,32	1,95	1,89
	1,40	1,93	1,96
	1,50	1,96	1,96
	1,70	1,87	1,97
	1,85	1,97	1,98
	Média*	1,92	1,93
Média total*		1,933	

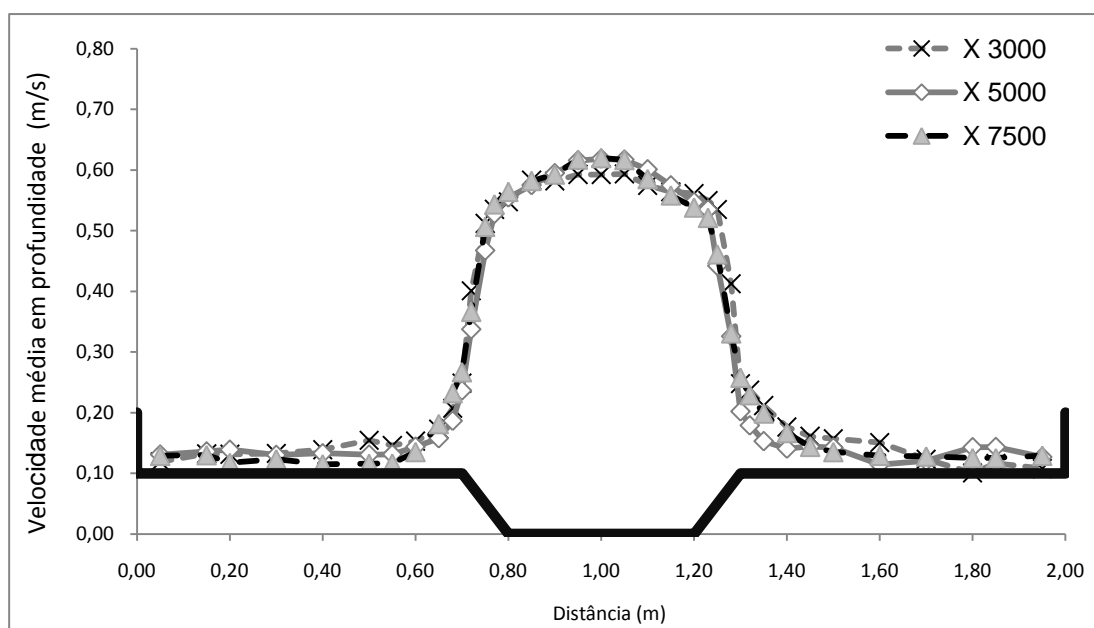
\* no cálculo da média das alturas de água no leito principal foi descontada a altura da margem  $h = 10$  cm

**Quadro 15 - Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo rugoso com  $h_r=0,15$** 

	Caudais impostos	X 3000		X 5000		X 7500	
$Q_{lc}$ (l/s)	3,7	3,8	103,2%	3,7	100,9%	3,8	103,7%
$Q_{lp}$ (l/s)	35,1	34,7	99,0%	35,5	101,1%	36,6	104,3%
	Factor	1,006		0,989		0,959	
	$h_{lc}$ (m)	0,0192					

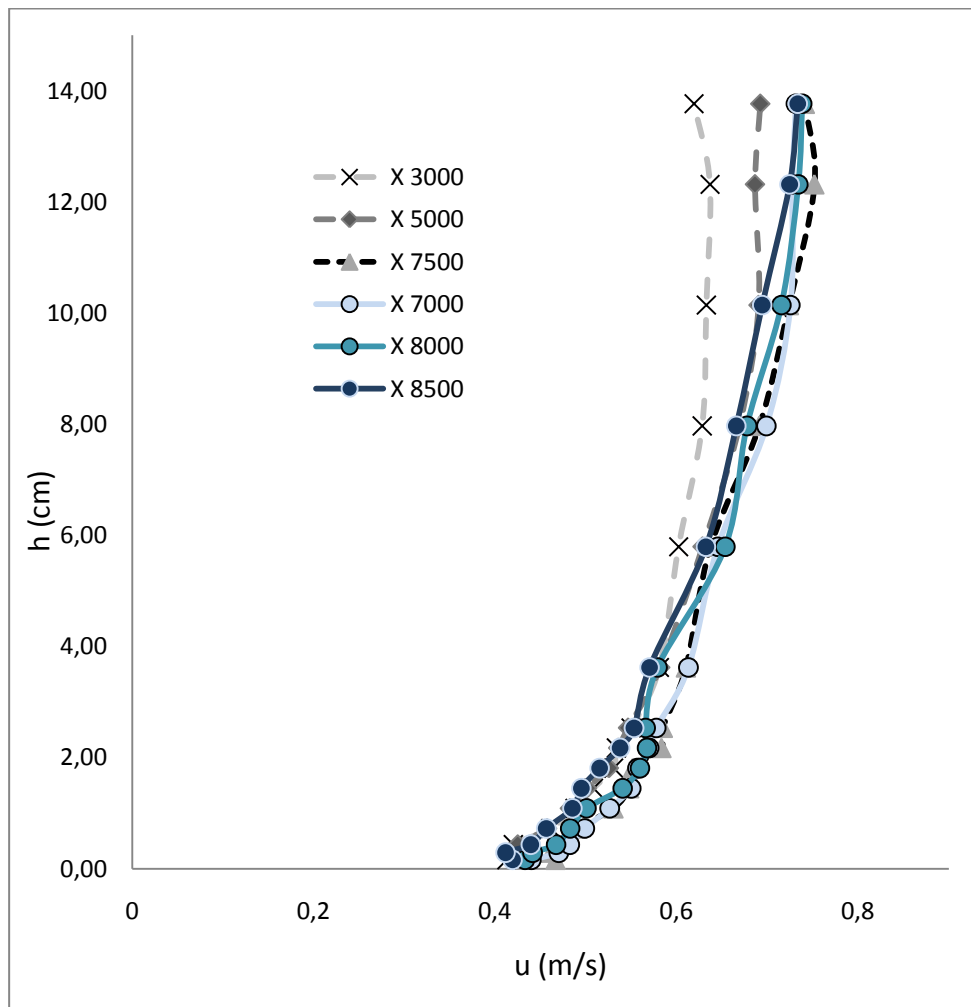
**Figura 61 – Evolução longitudinal do rácio  $Q_{lc}/Q$  -  $h_r=0,15$  em fundo rugoso (%)**

Na Figura 62 apresentam-se as distribuições transversais das velocidades médias em profundidade determinadas conforme anteriormente apresentado para os leitos de cheia lisos. As três secções do canal foram analisadas e os perfis apresentados demonstram velocidades da mesma ordem de grandeza com padrão semelhante em todas as secções, confirmando que pela calibração do canal se obteve efectivamente um regime uniforme de escoamento. As velocidades nos leitos de cheia são muito baixas subindo abruptamente logo após a proximidade com a interface entre o leito principal e o leito de cheia, onde o escoamento toma no centro o seu valor máximo.



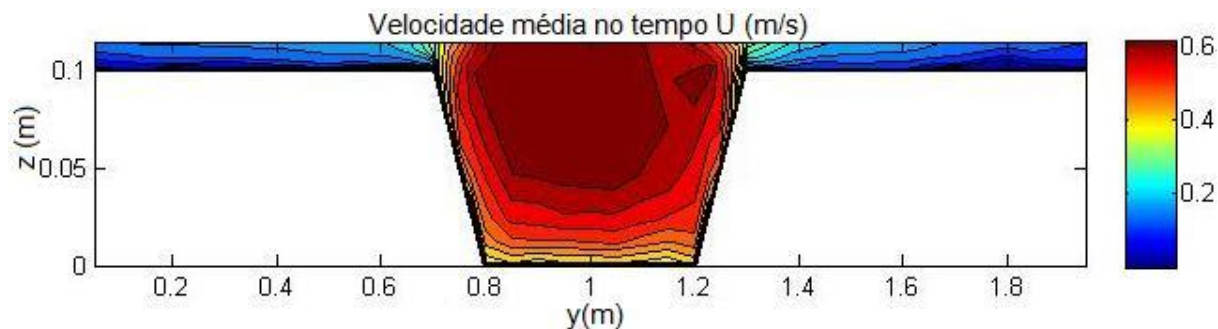
**Figura 62 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade -  $h_f=0,15$  em fundo rugoso**

No centro do canal (cota  $Y=100$  cm) foi elaborado o levantamento de perfis verticais de velocidade (*cf.* Figura 63) com 14 pontos medidos segundo a cota  $Z$  para as secções em estudo e ainda para  $X 7000$ ,  $X 8000$  e  $X 8500$ . O objectivo de acrescentar mais três secções ao estudo, sendo uma delas anterior à posição  $X 7500$  e as restantes posteriores a esta, foi a comparação destes perfis ao analisado para  $X 7500$ , reforçando a ideia de que caminhando para jusante no canal os perfis verticais de velocidade tendem para uma geometria e posição constantes.

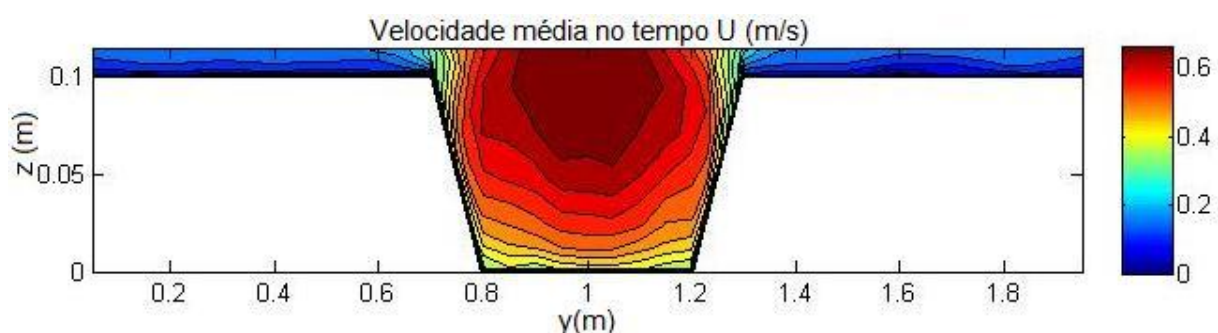


**Figura 63 – Perfis verticais de velocidades -  $h_r=0,15$  em fundo rugoso**

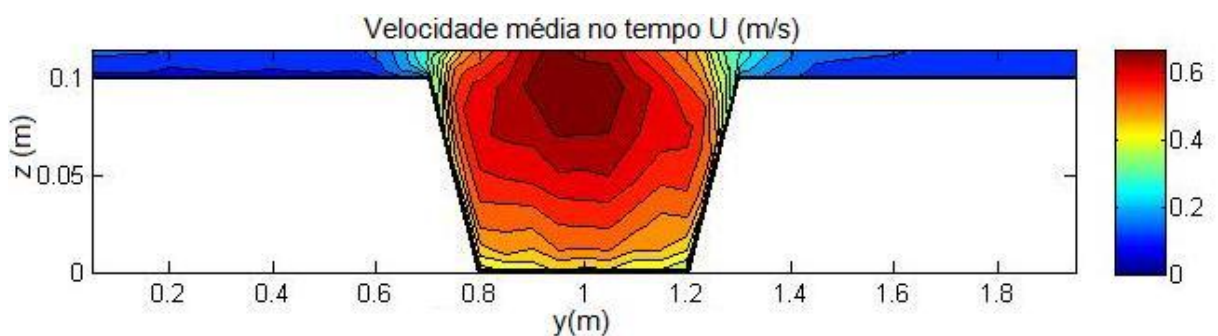
Nas Figuras 64, 65 e 66 estão apresentadas isolinhas de distribuição das velocidades médias no tempo para as secções em estudo, concentrando-se uma vez mais e como era esperado, as velocidades mais altas no centro do leito principal. No entanto nota-se uma diminuição gradual destas velocidades da secção X 3000 para a secção X 5000, e ainda mais visível desta secção para X 7500, com especial diminuição das velocidades na interface do leito principal com o leito de cheia, tendendo as menores velocidades a deslocarem-se para o leito principal. As velocidades dos leitos de cheia permaneceram sem alterações consideráveis excepto na zona da interface do leito principal com o leito de cheia, onde ao longo das secções as velocidades tendem a aumentar no início do leito de cheia.



**Figura 64 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 3000  $h_r=0,15$  em fundo rugoso**

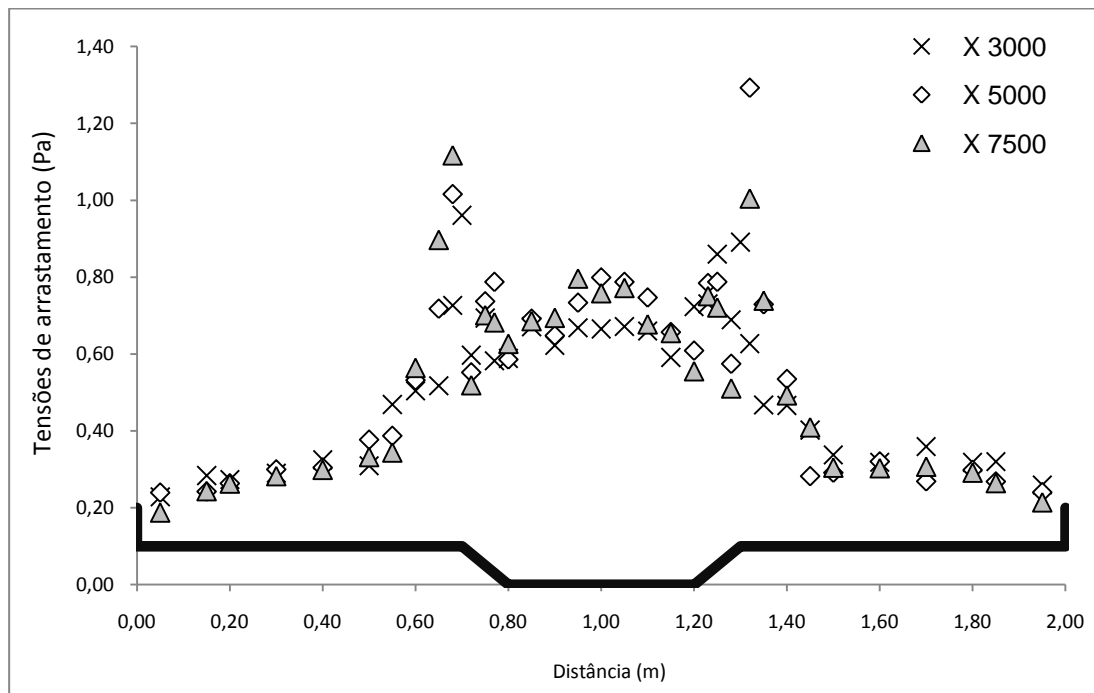


**Figura 65 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000  $h_r=0,15$  em fundo rugoso**



**Figura 66 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500  $h_r=0,15$  em fundo rugoso**

As distribuições transversais das tensões de arrastamento nas diferentes secções em estudo apresentam-se na Figura 67.



**Figura 67 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 –  $h_r=0,15$  em fundo rugoso**

O perfil apresentado mantém-se crescente desde as paredes do canal até à zona da interface onde as tensões aumentam bruscamente, diminuindo logo após a entrada no leito principal. Os valores das tensões para X 7500 são de uma forma geral, comparativamente às outras secções em estudo, menores nos leitos de cheia e maiores no leito principal.

Com vista à obtenção de um escoamento com  $h_r=0,30$  em regime uniforme foi uma vez mais seguido o processo de calibração do canal, medindo-se as alturas de água nas posições do canal indicadas no Quadro 16. A altura de escoamento considerada resultou da média das médias de alturas registadas a montante em X 4000 e a jusante em X 8000, com um valor considerado de 0,04493 cm. Os caudais impostos ao escoamento para a realização dos ensaios foram de 42,3 l/s para o leito principal e 16,6 l/s para os leitos de cheia. O rácio entre os caudais impostos ao escoamento e os caudais obtidos através da integração das velocidades medidas encontram-se apresentados no Quadro 17. Na Figura 68 apresenta-se a evolução longitudinal do rácio entre os caudais dos leitos de cheia e os caudais totais nas secções em estudo. Uma vez mais o rácio é praticamente constante ao longo do canal não existindo por isso transferências de massa significativas.

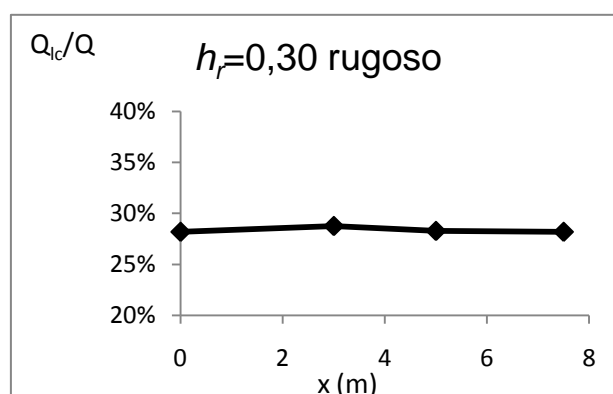
**Quadro 16 - Alturas de escoamento medidas para obtenção de regime uniforme –  $h_r=0,30$  em fundo rugoso**

	Y (m)	X 4000	X 8000
		Alturas de água (cm)	
Leito de cheia esquerdo	0,15	4,51	4,5
	0,30	4,53	4,48
	0,50	4,48	4,44
	0,60	4,48	4,58
	0,68	4,32	4,5
Leito Principal*	0,85	4,52	4,55
	1,00	4,58	4,55
	1,15	4,56	4,52
Leito de cheia direito	1,32	4,44	4,45
	1,40	4,46	4,5
	1,50	4,48	4,5
	1,70	4,51	4,51
	1,85	4,4	4,48
	Média*	4,48	4,50
	Média total*	4,49	

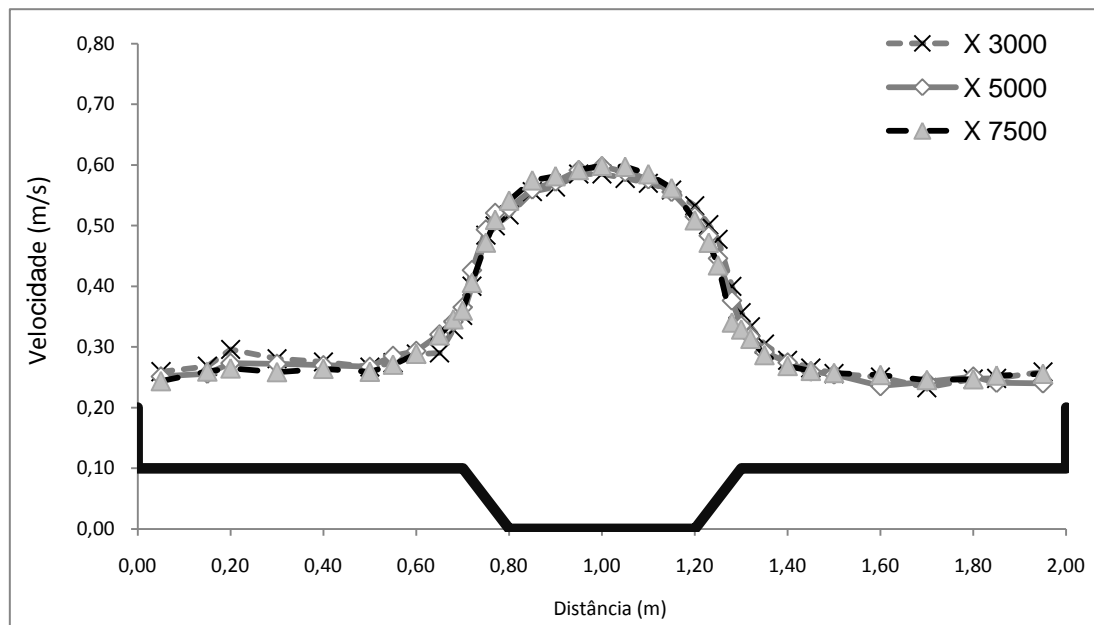
\* no cálculo da média das alturas de água no leito principal foi descontada a altura da margem  $h = 10$  cm

**Quadro 17 - Caudais obtidos experimentalmente para escoamento em fundo rugoso com  $h_r=0,30$** 

	Caudais impostos	X 3000		X 5000		X 7500	
$Q_{lc}$ (l/s)	16,6	17,4	105,0%	17,5	105,4%	17,1	103,1%
$Q_{lp}$ (l/s)	42,3	43,2	102,1%	44,4	104,9%	43,6	103,1%
	Factor	0,971		0,952		0,970	
	$h_{lc}$ (m)	0,0449					

**Figura 68 – Evolução longitudinal do rácio  $Q_{lc}/Q$  -  $h_r=0,30$  em fundo rugoso (%)**

Na Figura 69 estão apresentadas as distribuições transversais das velocidades médias em profundidade determinadas nas três secções do canal analisadas. As velocidades têm a mesma ordem de grandeza e padrão semelhante em todas as secções, confirmando uma convergência para um regime uniforme. As velocidades nos leitos de cheia são muito inferiores às do leito principal, o que vai de encontro ao facto de se ter aumentado a rugosidade nos leitos de cheia.



**Figura 69 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade -  $h_r=0,30$  em fundo rugoso**

Tal como para  $h_r=0,15$  foi elaborado um levantamento de perfis verticais de velocidade (cf. Figura 70) no centro do canal (cota  $Y=100$  cm) em 14 pontos medidos segundo a cota  $Z$  para as secções em estudo e ainda para X 7000, X 8000 e X 8500. Uma vez mais os perfis de velocidades tendem para uma situação de “equilíbrio”, semelhante ao traçado do perfil para X 7500.

Nas Figuras 71, 72 e 73 são apresentadas as isolinhas velocidade distribuídas pela secção transversal do canal no tempo. Com a obtenção do equilíbrio do escoamento na secção X 7500, as velocidades no leito principal decresceram da secção X 3000 para a secção X 5000, sendo ainda mais acentuada a sua diminuição desta para a secção X 7500, onde é maior a influência das velocidades baixas dos leitos de cheia sobre estas. Com a proximidade à interface, as velocidades tomam valores menores com o avanço nas secções



em estudo, sendo esta diminuição também visível nos leitos de cheia embora a uma escala menor.

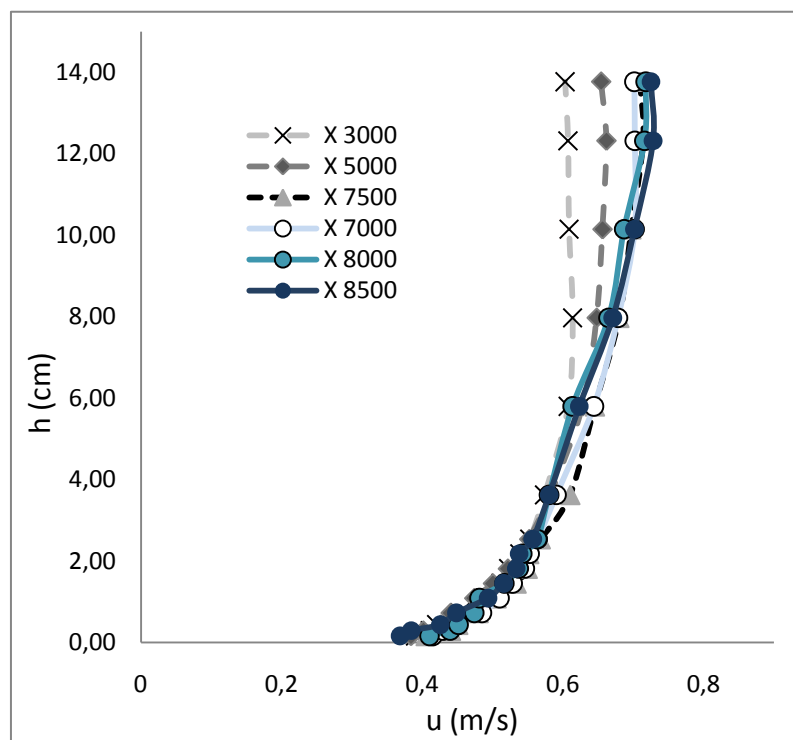


Figura 70 – Perfis vertical velocidades -  $h_r=0,30$  em fundo rugoso

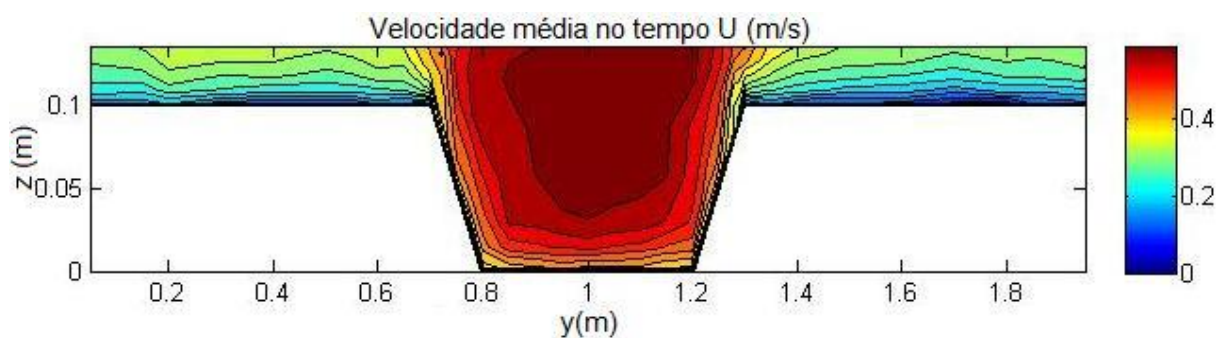
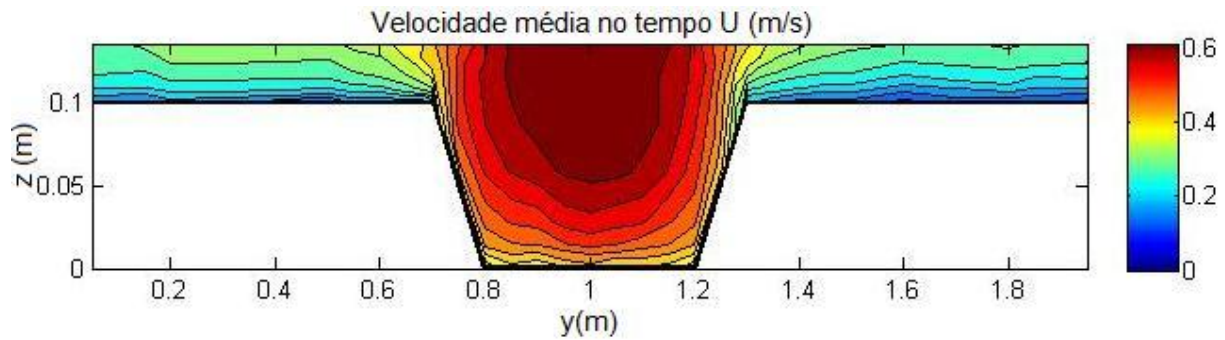
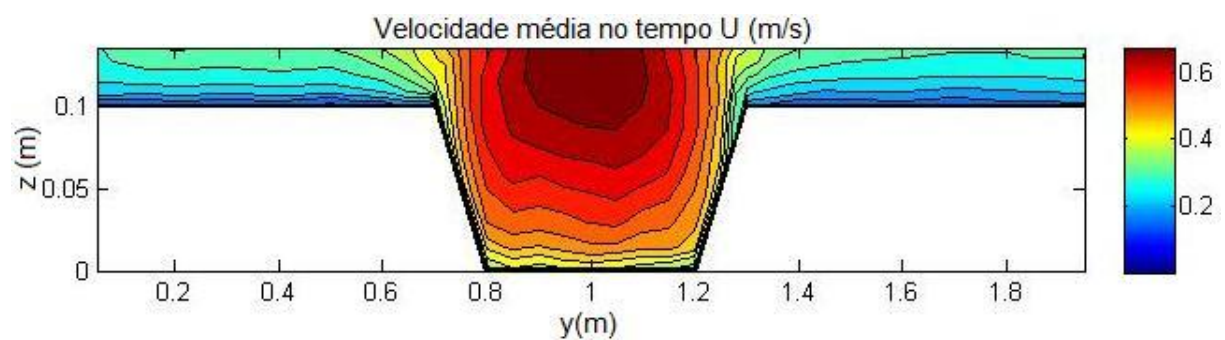


Figura 71 – Distribuição das velocidades médias no tempo -  $X=3000$   $h_r=0,30$  em fundo rugoso

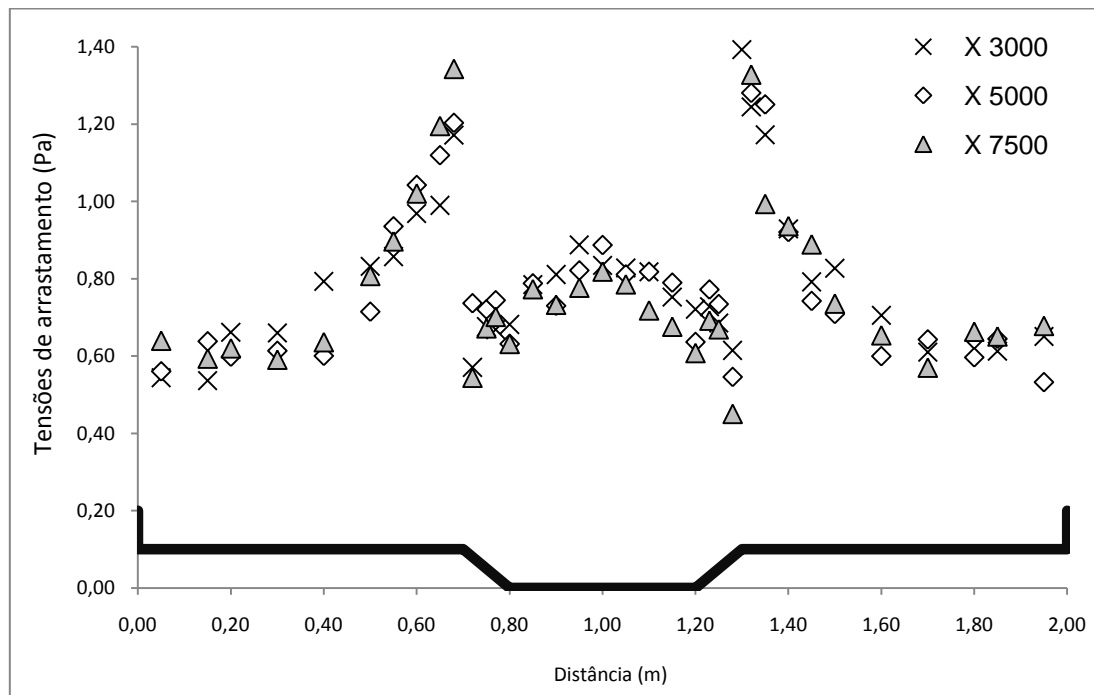


**Figura 72 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 5000  $h_r=0,30$  em fundo rugoso**



**Figura 73 – Distribuição das velocidades médias no tempo – X 7500  $h_r=0,30$  em fundo rugoso**

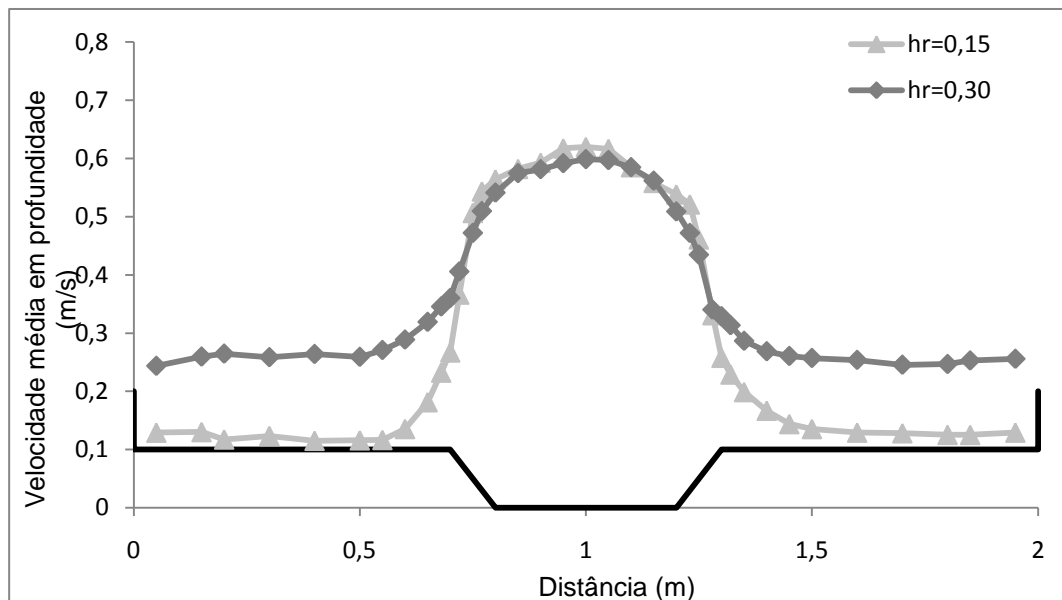
As distribuições transversais das tensões de arrastamento nas diferentes secções em estudo apresentam-se na Figura 74. As distribuições são semelhantes às apresentadas para as situações anteriores. Porém, contrariamente às outras situações, as tensões de arrastamento nos leitos de cheia aproximam-se dos valores observados no centro do leito principal. Isto significa que o aumento da rugosidade faz com que para velocidades menores (leitos de cheia) sejam produzidas tensões de arrastamento de menor ordem de grandeza que as obtidas para velocidades muito maiores em leito liso (leito principal).



**Figura 74 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento para X 3000, X 5000 e X 7500 –  $h_r=0,30$  em fundo rugoso**

Do mesmo modo que foram comparados os perfis de velocidades em secção transversal para X 7500 em leitos lisos para  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$ , na Figura 75 foi feita a mesma comparação mas para leitos rugosos. Tal como no caso de fundo liso (cf. Figura 59), com o aumento da altura relativa de  $h_r=0,15$  para  $h_r=0,30$  as velocidades no leito de cheia aumentam significativamente. No entanto esse aumento não se verifica como no caso dos leitos de cheia lisos, para o leito principal. Há uma diminuição embora pequena, das velocidades no leito principal para o escoamento com leitos de cheia rugosos. De notar é o facto de para  $h_r=0,30$  as velocidades médias em profundidade no leito principal são cerca de duas vezes e meia superiores às registadas para os leitos de cheia. A mesma análise para o caso de  $h_r=0,15$  mostra um rácio de cerca de duas vezes superior ao anterior, registando-se portanto velocidades no leito principal cinco vezes superiores (aproximadamente) às dos leitos de cheia. Assim para  $h_r=0,15$  as velocidades baixas do escoamento nos leitos de cheia e as velocidades do leito principal exercem entre si uma influência duas vezes superior à sentida para  $h_r=0,30$ , sendo neste caso a transferência de quantidade de movimento entre leitos menor.

Com o sucessivo aumento da altura relativa do canal de secção composta, o seu comportamento tenderia para o comportamento de um canal simples, e com ele para a uniformização das velocidades ao longo de toda a largura do canal, tendência visível na Figura 75 com a passagem de  $h_r=0,15$  para  $h_r=0,30$ .

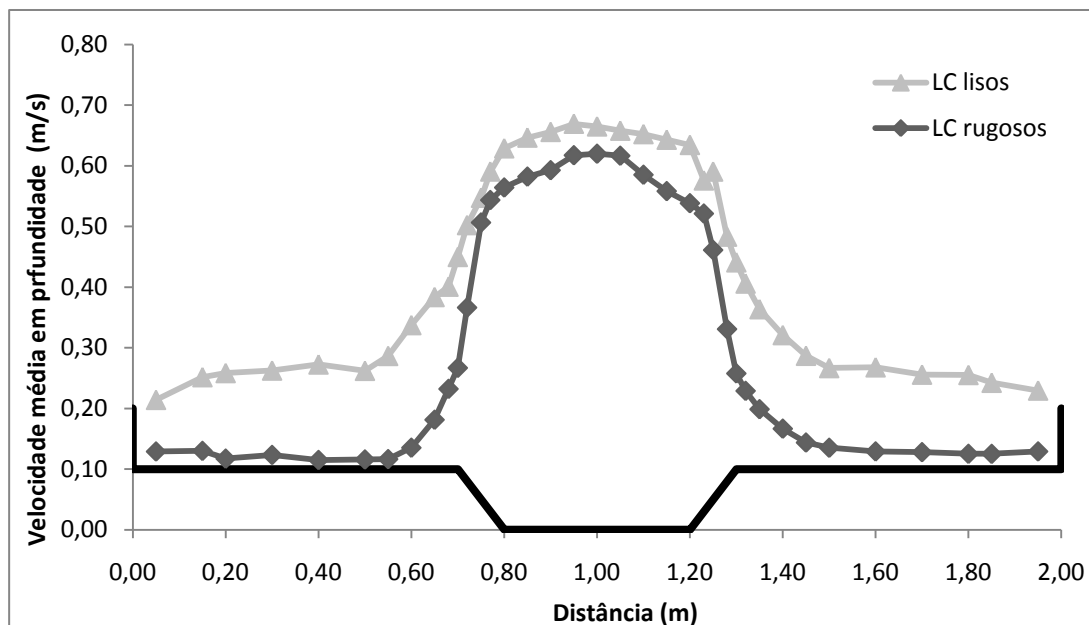


**Figura 75 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade – comparação para X 7500 entre  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$  em fundo rugoso**

Importante também é comparar as velocidades do escoamento para as mesmas alturas relativas mas com leitos de cheia lisos e rugosos. Na Figura 76 encontra-se representado o perfil de velocidades em secção transversal na secção X 7500 para uma  $h_r=0,15$  com altura de escoamento  $h=0,0172$  m em fundo liso, comparado ao perfil de velocidades na mesma secção e com a mesma altura relativa em fundo rugoso com  $h=0,0192$  m. Verifica-se uma diminuição de todas as velocidades com a passagem do fundo dos leitos de cheia lisos para rugosos, diminuindo mais nos leitos de cheia do que no leito principal, pois neste não foi aumentada a rugosidade sendo as suas velocidades apenas afectadas pelas velocidades dos leitos de cheia.

Para uma altura relativa de  $h_r=0,15$  foram impostos com leitos de cheia em fundo liso os caudais de 38,2 l/s e 6,6 l/s para leito principal e leitos de cheia respectivamente, enquanto na situação de leitos de cheia rugosos os caudais foram de 35,1 l/s e 3,7 l/s. Ora se com a passagem de lisos a rugosos os leitos de cheia impuseram uma pequena

diminuição no caudal escoado no leito principal, já nos leitos de cheias o caudal escoado passou para quase metade. Pela análise destes caudais torna-se clara a diminuição da capacidade de vazão do canal após a colocação da relva sintética nos leitos de cheia.

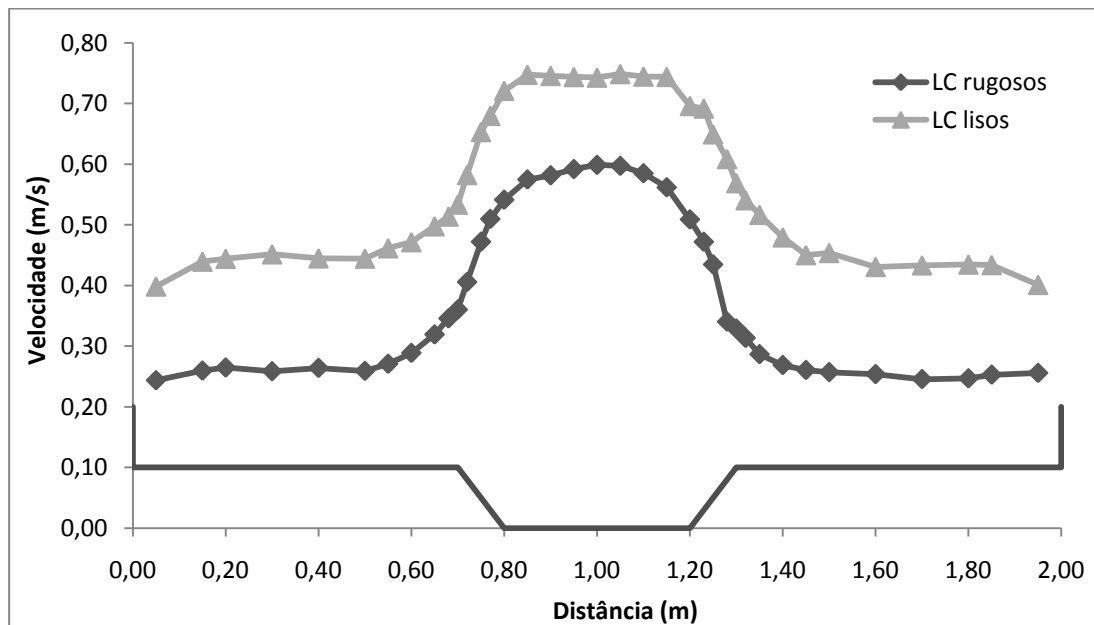


**Figura 76 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em X 7500 com  $h_r=0,15$  – comparação entre fundo liso e fundo rugoso**

A mesma análise feita para o caso de altura relativa  $h_r=0,30$  resulta na Figura 77, em que do mesmo modo para leitos de cheia rugosos todas as velocidades baixaram. No entanto esta diminuição mantém a mesma ordem de grandeza quer para os leitos de cheia quer para o leito principal.

As tensões de arrastamento aumentam nos leitos de cheia com o aumento da altura relativa (cf. Figura 78), mantendo-se constantes no leito principal.

Nas Figuras 79 e 80 são apresentadas as distribuições transversais das tensões de arrastamento em fundo rugoso, comparadas com as registadas para as mesmas alturas relativas em fundo liso.

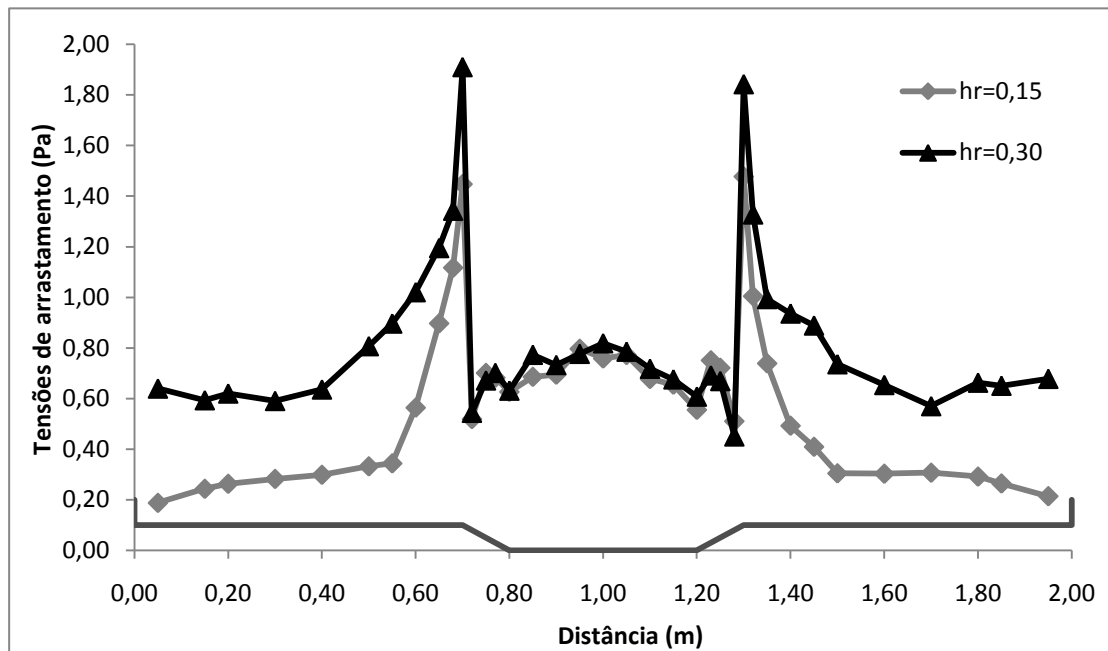


**Figura 77 – Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em X 7500 com  $h_r=0,30$  – comparação entre fundo liso e fundo rugoso**

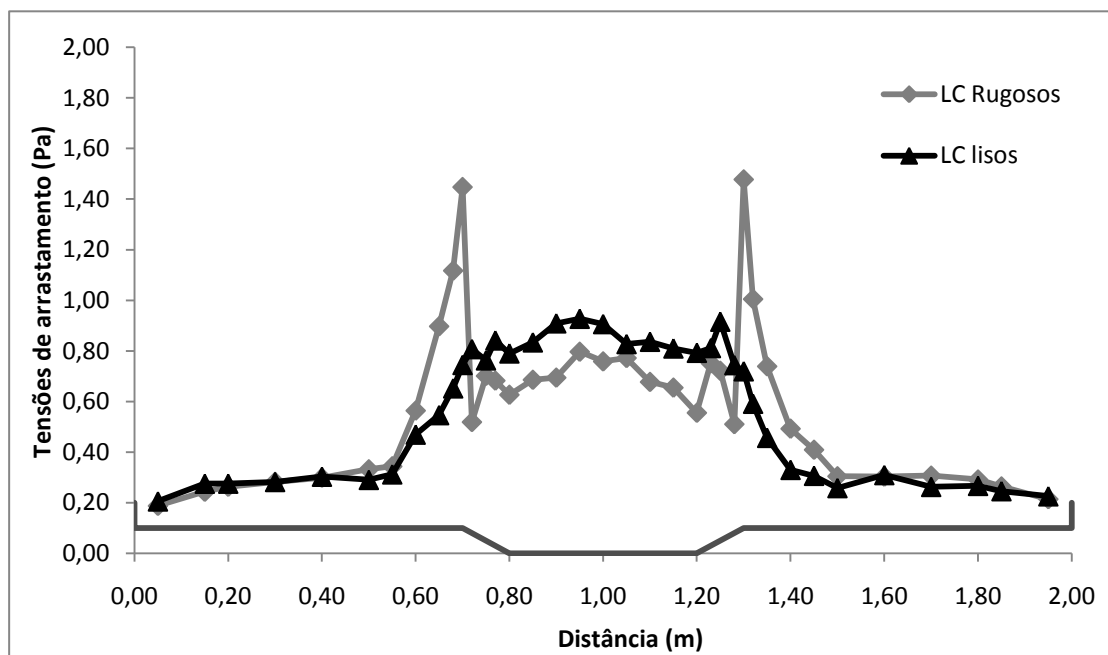
Na Figura 79 são sobrepostos os perfis das tensões de arrastamento em X 7500 para leitos de cheia lisos e rugosos, com ambos os escoamentos em  $h_r=0,15$ . Os valores nos leitos de cheia são semelhantes até sensivelmente metade da sua largura, onde começam a aumentar com a proximidade à interface de interacção com o leito principal, sendo este aumento bastante maior para a situação de leitos de cheia rugosos, que atinge na interface valores muito superiores aos das tensões para leitos de cheia lisos. No leito principal os perfis invertem-se e a situação de leitos de cheia lisos toma valores de tensão de arrastamento superiores em toda a sua largura. Existe portanto uma interacção maior entre os leitos do que no caso dos leitos de cheia lisos. Se no caso de  $h_r=0,15$  (cf. Figura 76) isto se pode explicar com base no aumento de  $\partial U/\partial y$ , no caso de  $h_r=0,30$  (cf. Figura 77) essa justificação não serve dado que  $\partial U/\partial y$  é muito semelhante.

Para a situação de  $h_r=0,30$  os perfis das tensões de arrastamento para leitos de cheia lisos e rugosos sobrepostos mantêm a tendência dos apresentados para  $h_r=0,15$  mas com valores de maior ordem de grandeza e diferenças ainda maiores quer seja no crescimento com a proximidade à interface, quer seja no leito de cheia em que os valores das tensões para leitos de cheia lisos são notavelmente maiores que os medidos para a situação de leitos de cheia rugosos.

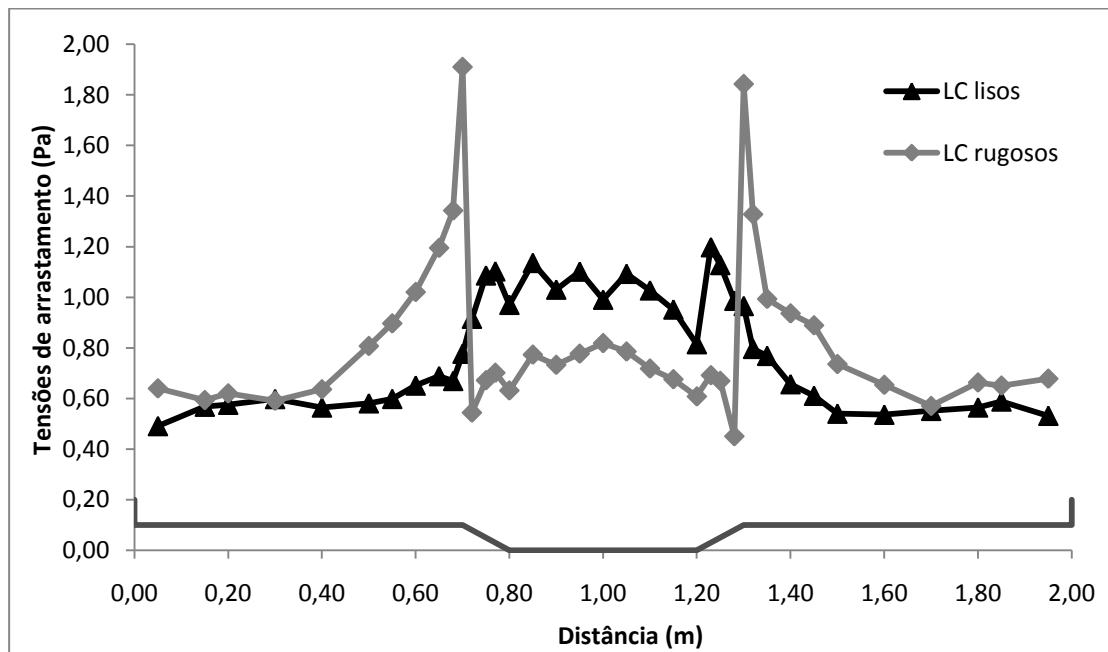
É possível que para a maior altura relativa a turbulência gerada junto ao fundo rugoso passe a ter maior importância do que a turbulência gerada na camada de mistura.



**Figura 78 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento em fundo Rugoso – comparação para X 7500 entre  $h_r=0,15$  e  $h_r=0,30$**



**Figura 79 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento em X 7500 com  $h_r=0,15$  – comparação entre fundo liso e fundo rugoso**



**Figura 80 – Distribuição transversal das tensões de arrastamento em X 7500 com  $h_r=0,30$  – comparação entre fundo liso e fundo rugoso**

Na Figura 81 apresentam-se os valores das tensões de arrastamento adimensionalizados por  $\tau_0 / \gamma R S_0$  que se aproximam do valor unitário no centro do leito principal bem como no centro dos leitos de cheia, onde o escoamento é essencialmente em 2D.

No leito de cheia junto à interface as tensões de arrastamento excedem em muito a componente gravítica, o que significa que o escoamento é tridimensional apresentando uma turbulência superior ao escoamento em 2D.



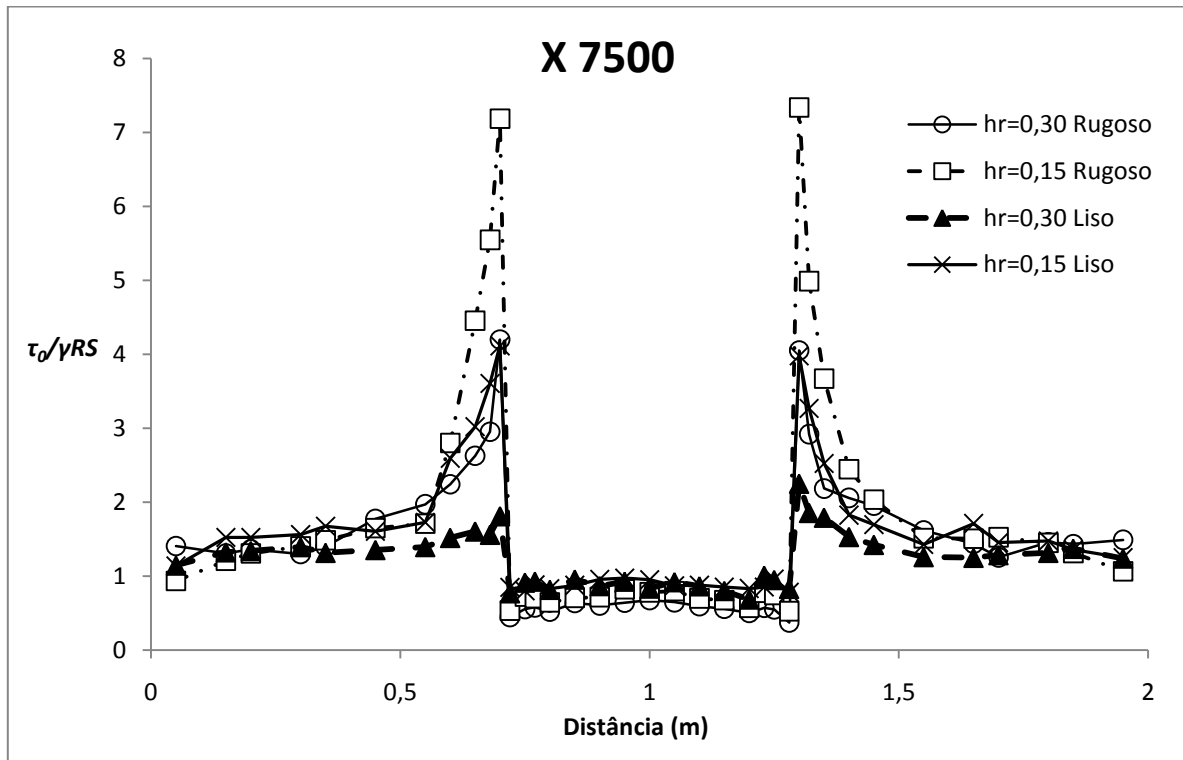


Figura 81 - Valores das tensões de arrastamento adimensionalizados por  $\tau_0 / \gamma RS$

#### 4.4. DETERMINAÇÃO DA LARGURA DA CAMADA DE MISTURA

Conforme anteriormente apresentado no subcapítulo 2.1.3, a largura da camada de mistura pode ser determinada por diferentes métodos, embora com a mesma abordagem, têm em conta diferentes características do escoamento. Na presente dissertação foram determinadas e analisadas três metodologias de cálculo. Os perfis transversais de velocidades que serviram de base à determinação dos valores das coordenadas  $y_{P\%}$ , referente à velocidade a  $P\%$ , entre as velocidades nos leitos de cheia e no leito principal, apresentam-se em anexo para todos os casos determinados, juntamente com os perfis transversais de velocidades adimensionalizados.

No Quadro 18 são apresentados todos os valores determinados utilizando a metodologia de Pope (2000) para a largura da camada de mistura,  $\delta$ , nas margens esquerda e direita, para cada uma das três secções em estudo. Esta determinação foi elaborada para as duas alturas relativas estudadas, em leitos de cheia lisos e leitos de cheia rugosos.

**Quadro 18 – Valores determinados para a largura da camada de mistura – metodologia de Pope (2000)**

Pope (2000)			$\delta(x)$ (m)		
			X 3000	X 5000	X 7500
Leitos de cheia Lisos	$h_r=0,15$	margem esquerda	0,25	0,24	0,24
		margem direita	0,20	0,21	0,23
	$h_r=0,30$	margem esquerda	0,25	0,25	0,20
		margem direita	0,20	0,2	0,23
Leitos de cheia Rugosos	$h_r=0,15$	margem esquerda	0,13	0,12	0,15
		margem direita	0,17	0,15	0,23
	$h_r=0,30$	margem esquerda	0,17	0,22	0,21
		margem direita	0,15	0,18	0,18

No Quadro 19 estão apresentados os resultados dos valores determinados para  $\delta$ , de acordo com a metodologia proposta por Prooijen e Uijttewaal (2002), para as diferentes secções nos diferentes escoamentos em estudo. No Quadro 20 encontram-se apresentados os valores das larguras das camadas de mistura determinados segundo os pressupostos sugeridos por Prooijen *et al.*, (2005) para todos os casos anteriormente estudados.

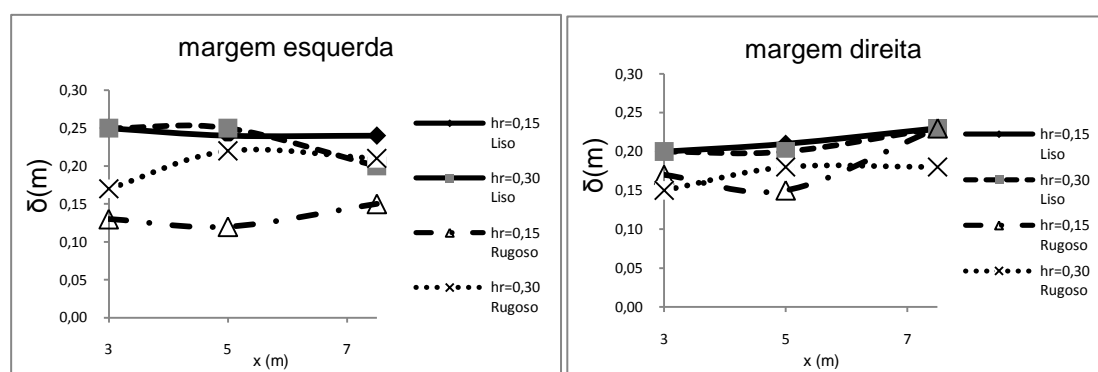
**Quadro 19 – Valores determinados para a largura da camada de mistura – metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**

Prooijen e Uijttewaal (2002)			$\delta(x)$ (m)		
			X 3000	X 5000	X 7500
Leitos de cheia Lisos	$h_r=0,15$	margem esquerda	0,16	0,18	0,25
		margem direita	0,12	0,11	0,13
	$h_r=0,30$	margem esquerda	0,16	0,18	0,17
		margem direita	0,18	0,18	0,18
Leitos de cheia Rugosos	$h_r=0,15$	margem esquerda	0,08	0,12	0,12
		margem direita	0,07	0,08	0,09
	$h_r=0,30$	margem esquerda	0,16	0,18	0,25
		margem direita	0,12	0,12	0,13

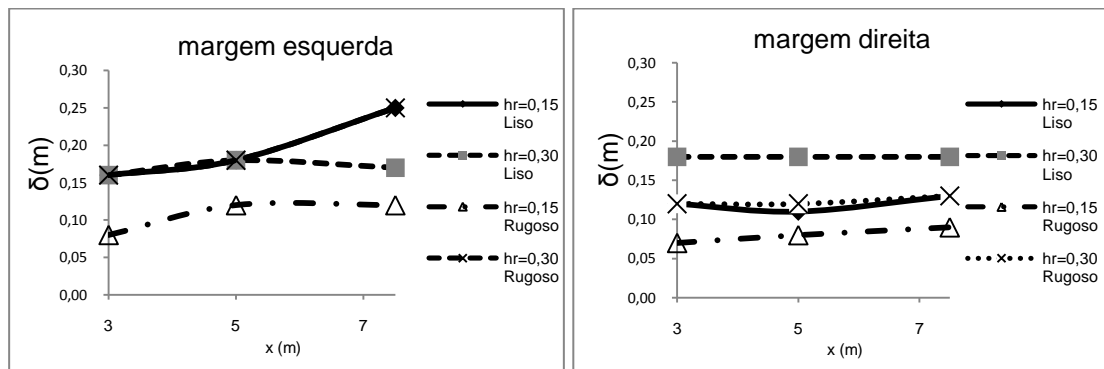
**Quadro 20 – Valores determinados para a largura da camada de mistura – metodologia de Prooiijen *et al.* (2005)**

Prooiijen <i>et al.</i> (2005)			$\delta(x)$ (m)		
			X 3000	X 5000	X 7500
Leitos de cheia Lisos	$h_r=0,15$	margem esquerda	0,18	0,19	0,26
		margem direita	0,16	0,19	0,19
	$h_r=0,30$	margem esquerda	0,17	0,18	0,15
		margem direita	0,18	0,19	0,20
Leitos de cheia Rugosos	$h_r=0,15$	margem esquerda	0,08	0,11	0,12
		margem direita	0,08	0,11	0,13
	$h_r=0,30$	margem esquerda	0,15	0,14	0,18
		margem direita	0,15	0,16	0,16

Na Figura 82 são apresentadas as evoluções da espessura da camada de mistura para as margens esquerda e direita do canal utilizando a metodologia de Pope (2000). Em cada uma das figuras são apresentadas as evoluções para os quatro casos de escoamento estudados.

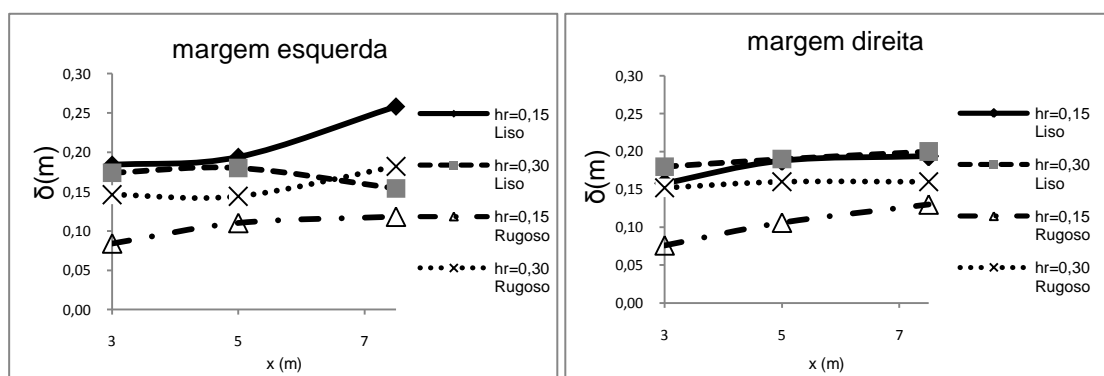
**Figura 82 - Evolução longitudinal da largura da camada de mistura para as margens esquerda e direita – metodologia de Pope (2000)**

A mesma análise foi efectuada segundo a metodologia de Prooiijen e Uijttewaall (2002), apresentada na Figura 83.



**Figura 83 - Evolução longitudinal da largura da camada de mistura para as margens esquerda e direita – metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**

Na Figura 84 estão apresentadas as evoluções longitudinais das espessuras das camadas de mistura determinadas segundo a metodologia de Prooijen *et al.* (2005) para as diferentes condições de escoamento estudadas.



**Figura 84 – Evolução longitudinal da largura da camada de mistura para as margens esquerda e direita – metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**

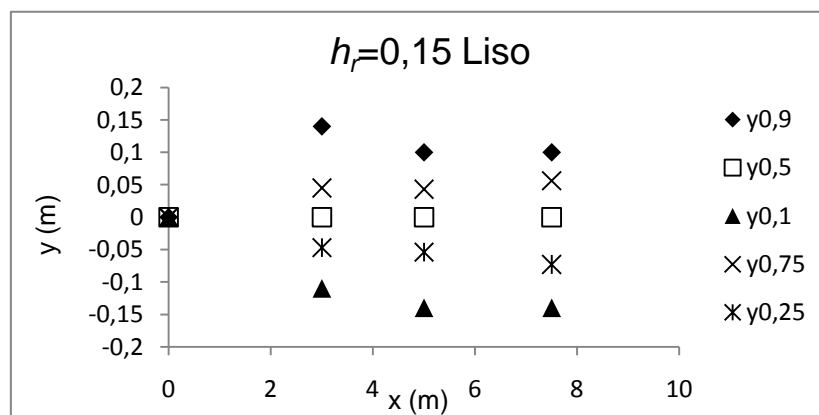
Os resultados da largura da camada de mistura obtidos pelos três métodos (*cf.* Figuras 82, 83 e 84) apresentam uma dispersão, sendo inclusivamente diferentes da margem esquerda para a margem direita, o que significa que as metodologias propostas são muito sensíveis a pequenos erros de medição.

O desenvolvimento da camada de mistura na interface do leito principal com os leitos de cheia foi analisado para as margens esquerda e direita do canal, considerando os valores determinados para a posição lateral de referência (transversal ao canal) das percentagens

$y_{10\%}$  e  $y_{90\%}$  sugeridas por Pope (2000), apresentadas simultaneamente com as propostas por Prooijen e Uijttewaai (2002) e Prooijen *et al.* (2005).

Em todos os ensaios as posições  $y_{p\%}$  parecem manter-se praticamente constantes ao longo do canal, após  $X = 3$  m. No caso de  $h_r=0,15$  (cf. Figura 85) em fundo liso a camada de mistura parece ser quase simétrica estendendo-se de igual modo para o leito de cheia e para o leito principal. Com o aumento da altura relativa (cf. Figura 86) a camada de mistura parece estender-se menos para o leito de cheia e mais para o leito principal. Porém, a velocidade em  $y_{50\%}$  mantém-se sempre na mesma posição da interface.

Para  $h_r=0,15$  e fundo rugoso (cf. Figura 87), a camada de mistura no leito principal é semelhante à de fundo liso (cf. Figura 85). No entanto, no leito de cheia a camada de mistura é muito menor o que vai de encontro ao facto de a rugosidade do fundo limitar o desenvolvimento da camada de mistura (cf. Prooijen *et al.*, 2005). No caso da altura relativa  $h_r=0,30$ , os resultados para fundo rugoso (cf. Figura 88) são muito semelhantes aos obtidos para fundo liso (cf. Figura 86).



**Figura 85 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para  $h_r=0,15$  Liso**

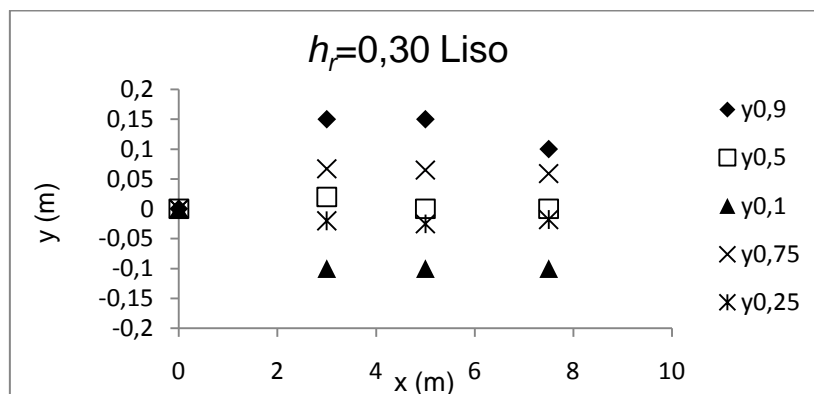


Figura 86 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para  $h_r=0,30$  Liso

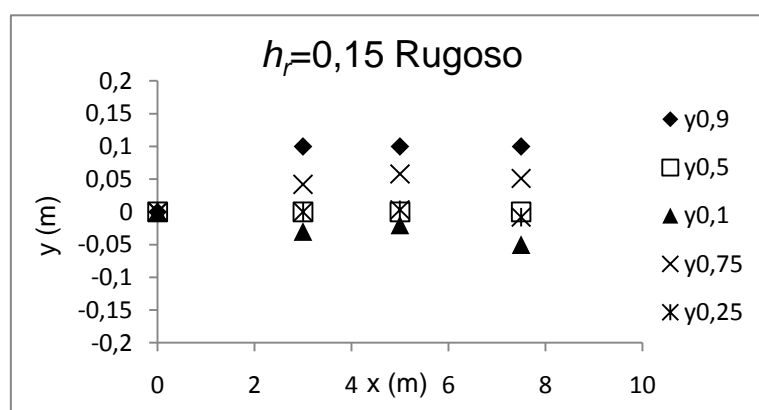


Figura 87 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para  $h_r=0,15$  Rugoso

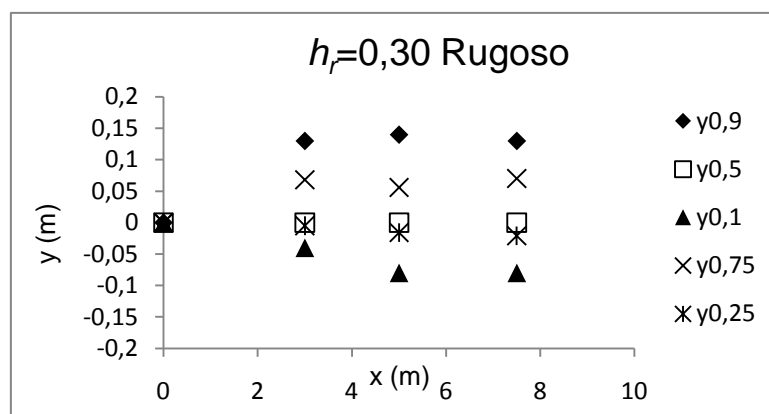


Figura 88 – Desenvolvimento longitudinal da camada de mistura – margem esquerda para  $h_r=0,30$  Rugoso

#### 4.5. DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE EFECTIVA

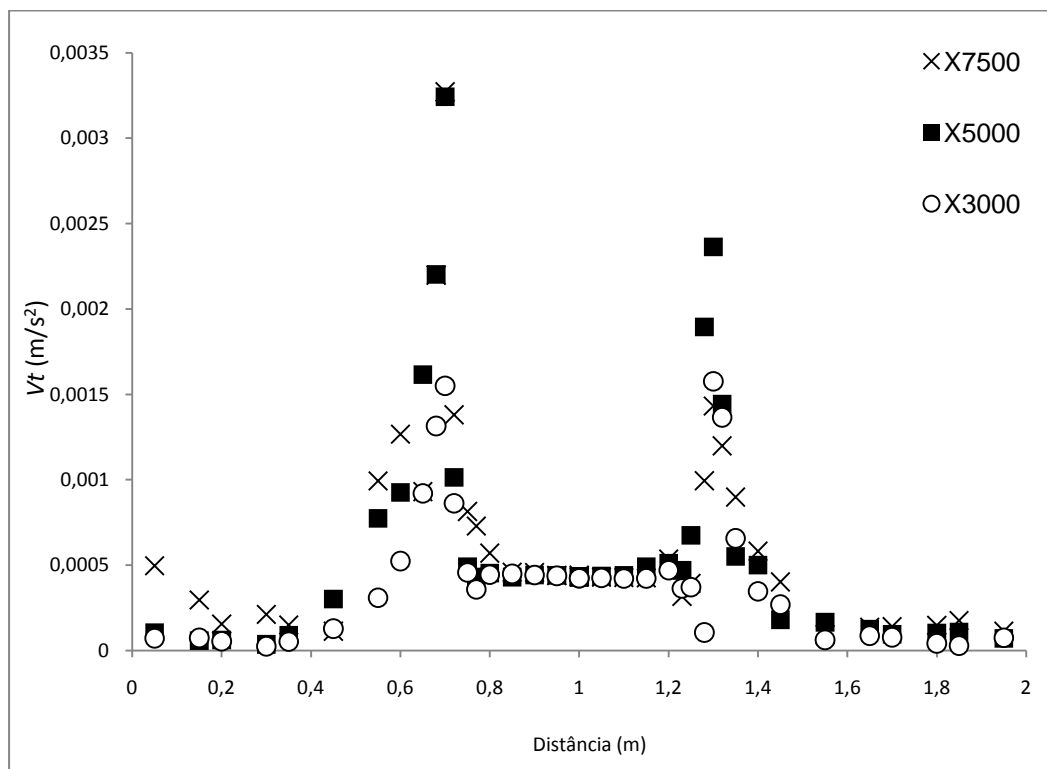
Em anexo nos Quadros 21, 22, 25 e 27 encontram-se apresentados os valores determinados para os coeficientes característicos a velocidade e altura de água para as três secções dos quatro casos de escoamento em estudo. Nos mesmos quadros encontram-se também as respectivas derivadas da velocidade média em ordem a  $y$  determinadas por interpolação com recurso ao polinómio de Lagrange apresentado na equação (58), que tem em conta três pontos adjacentes, independentemente do espaçamento entre eles (Chapra, 2006).

$$f'(x) = f(x_{i-1}) \frac{x_i - x_{i-1}}{(x_{i-1} - x_i)(x_{i-1} - x_{i+1})} + f(x_i) \frac{2x - x_{i-1} - x_{i+1}}{(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})} + f(x_{i+1}) \frac{x_i - x_{i-1}}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i+1})} \quad (58)$$

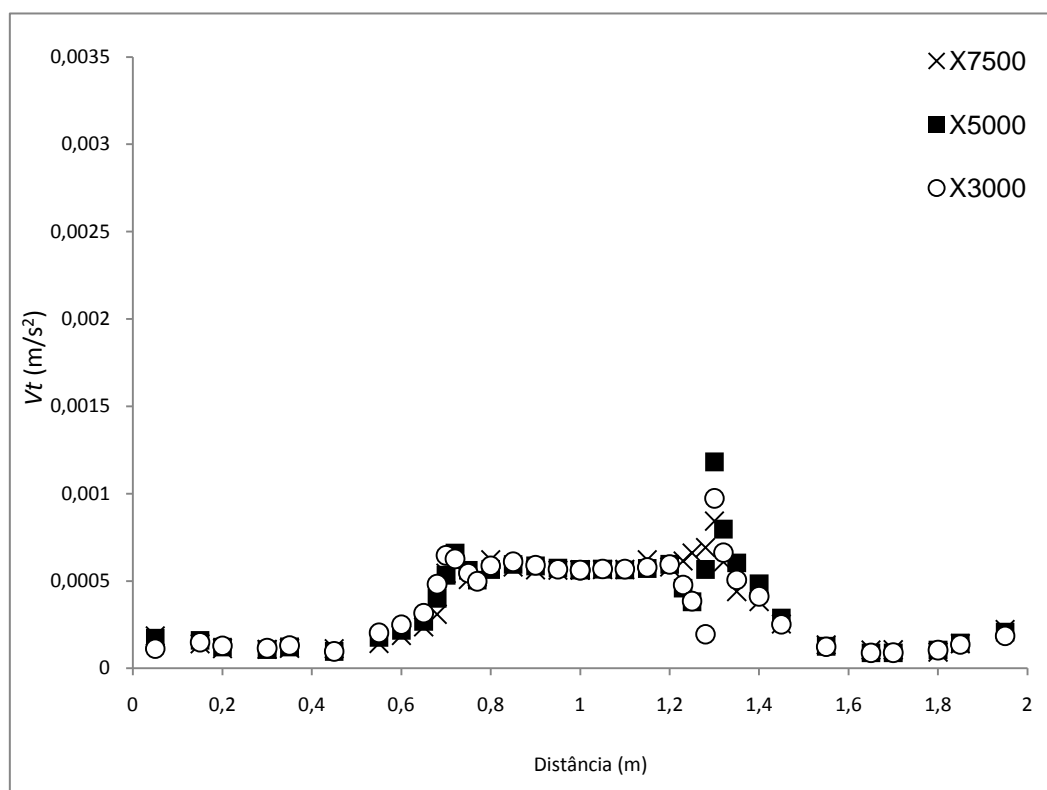
Ainda em anexo, nos Quadros 22, 24, 26 e 28 estão calculados separadamente os valores da viscosidade efectiva  $\nu_t$  e das suas componentes  $\nu'_t$  e  $\nu''_t$ , componente turbulenta no fundo e componente turbulenta na interface do leito principal com o leito de cheia, respectivamente (cf. Prooijen *et al.*, 2005). Os valores da viscosidade efectiva  $\nu_t$  obtidos ao longo de toda a secção transversal, para todas as secções estudadas, apresentam-se nas Figuras 89, 90, 91 e 92.

Estes resultados permitem analisar não só a distribuição transversal de  $\nu_t$  como também a evolução das suas componentes  $\nu'_t$  e  $\nu''_t$  ao longo e na interface entre leitos. Torna-se de igual modo visível a influência que cada uma delas tem no valor total da viscosidade efectiva em cada ponto de uma determinada secção transversal do canal.

Em geral, para todos os ensaios verifica-se um ligeiro aumento da viscosidade turbulenta da secção X 3000 para as secções mais a jusante, o que indica que os fenómenos turbulentos se estão a desenvolver. Para  $h_r=0,15$  e fundo liso (cf. Figura 89) a viscosidade turbulenta é muito superior à dos outros ensaios indicando que é para este ensaio que a turbulência na camada de mistura é mais importante. Com o aumento da altura relativa (cf. Figura 90), o valor da viscosidade turbulenta diminui muito. O mesmo acontece para a mesma altura relativa mas passando de fundo liso para fundo rugoso.



**Figura 89 – Distribuição transversal de  $v_t$  –  $h_r=0,15$  Liso**



**Figura 90 – Distribuição transversal de  $v_t$  –  $h_r=0,30$  Liso**



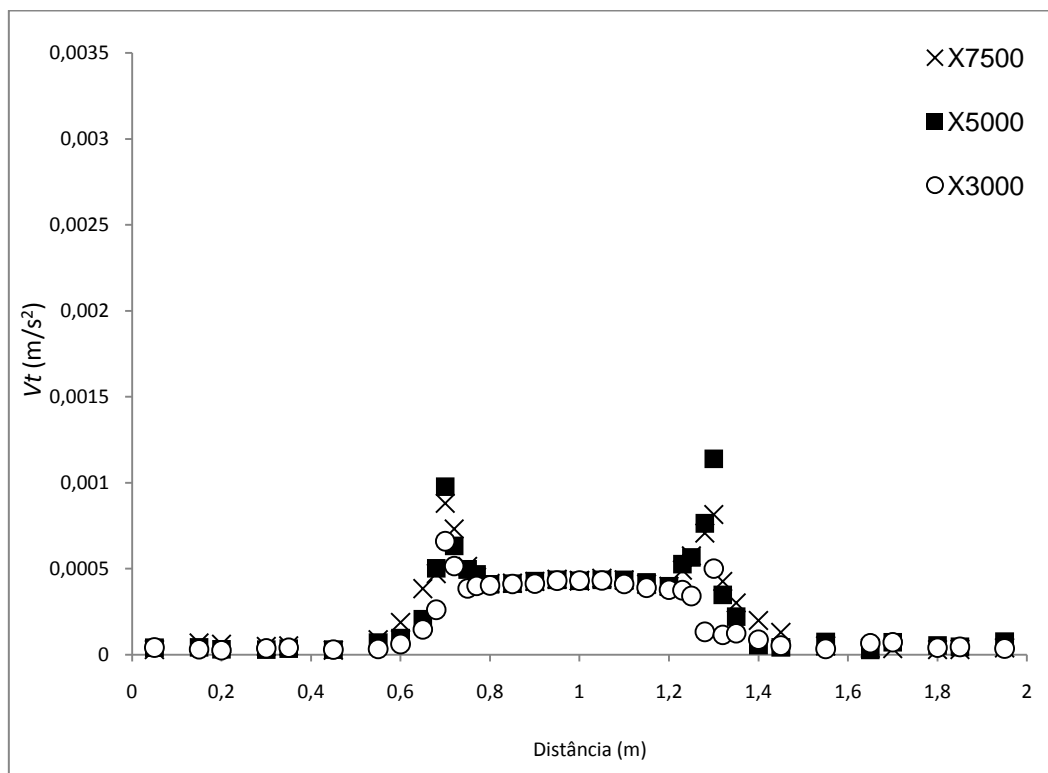


Figura 91 – Distribuição transversal de  $v_t$  –  $h_r=0,15$  Rugoso

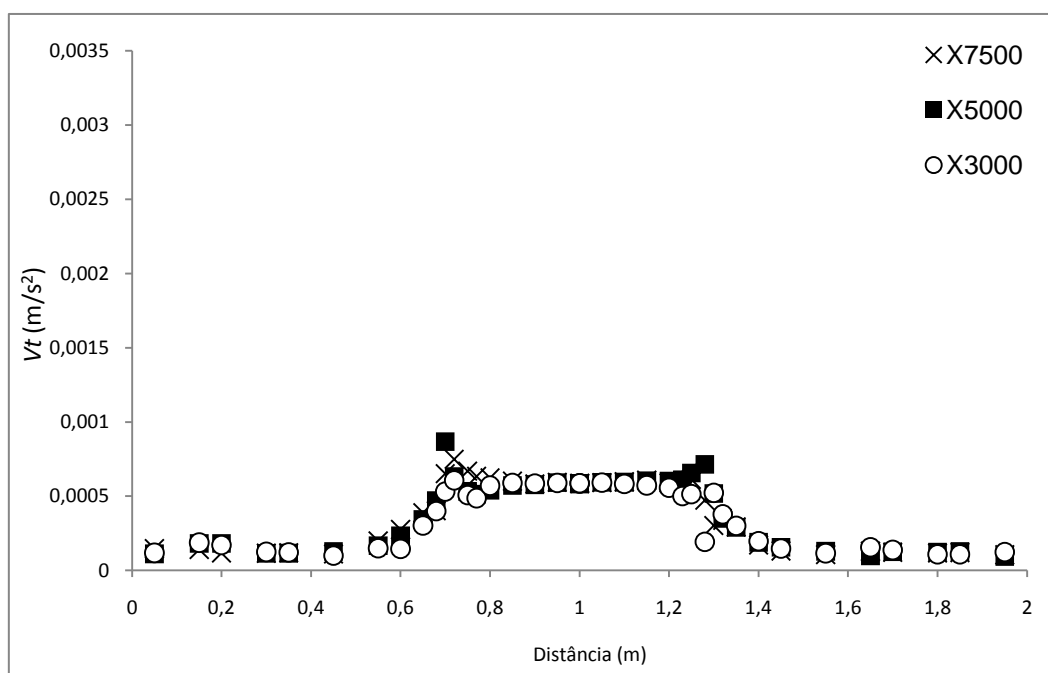
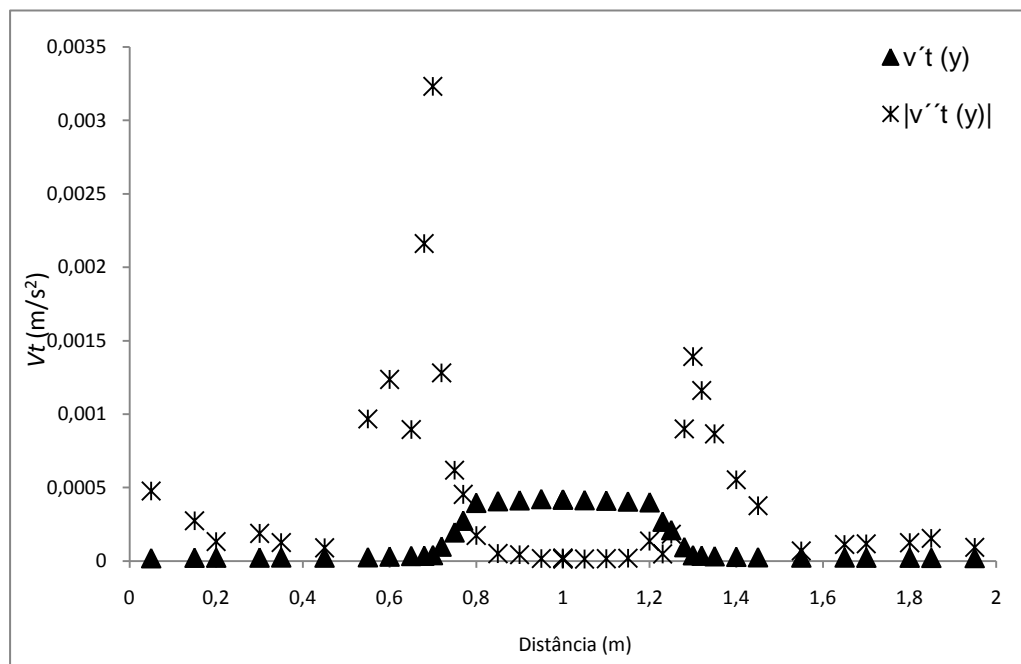


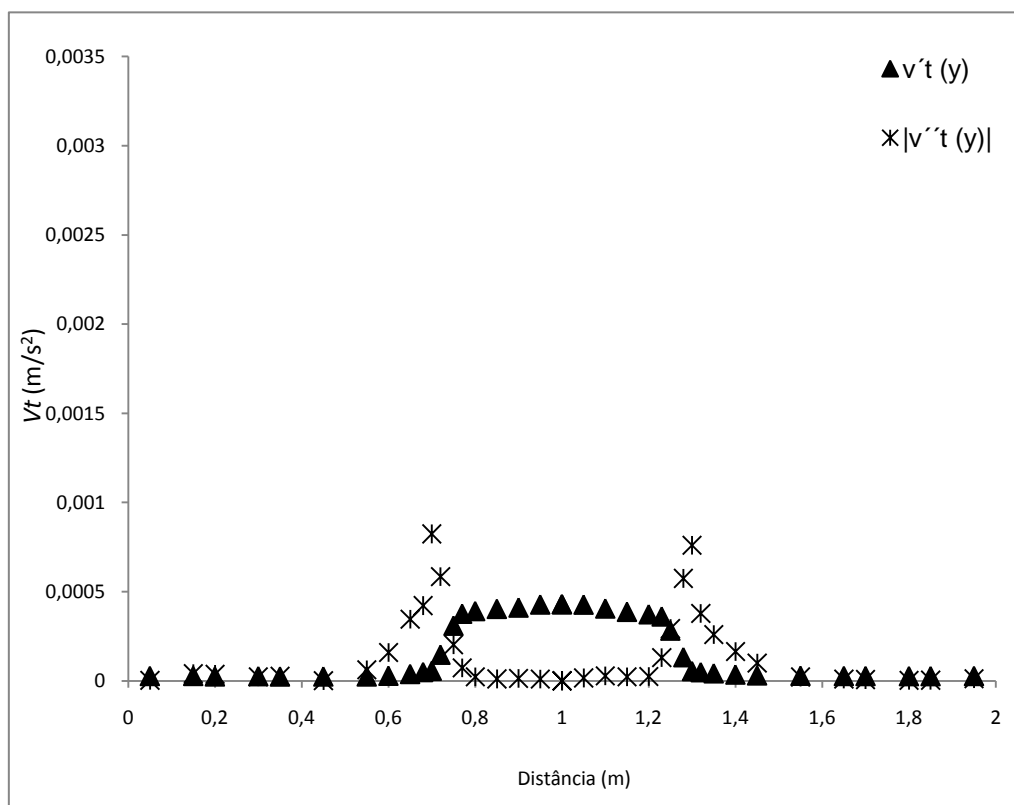
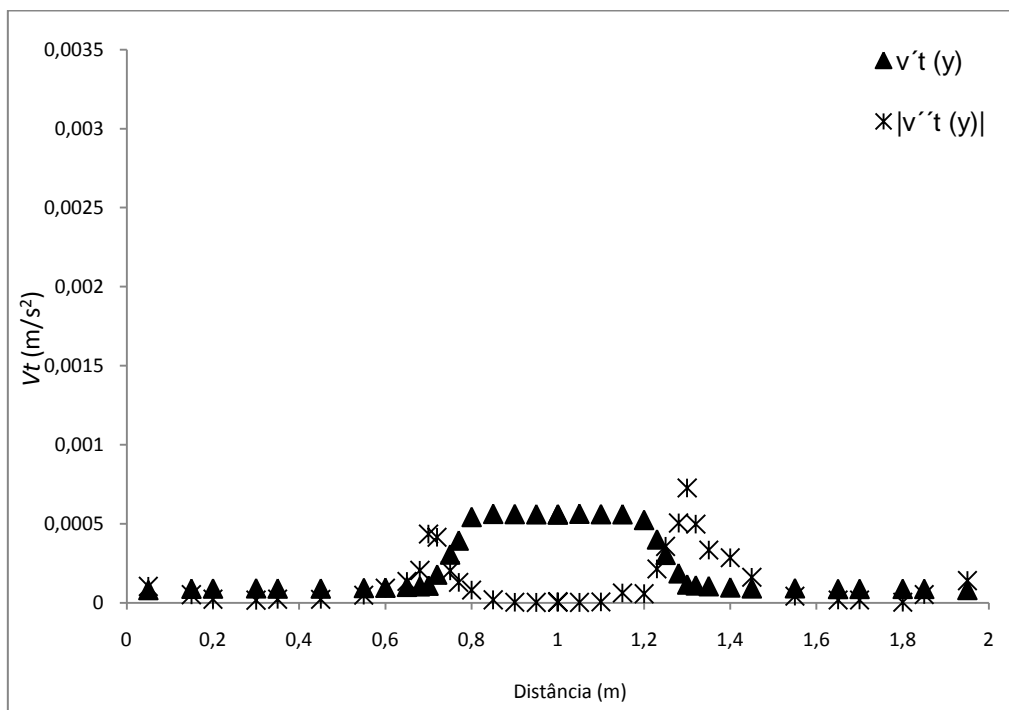
Figura 92 – Distribuição transversal de  $v_t$  –  $h_r=0,30$  Rugoso

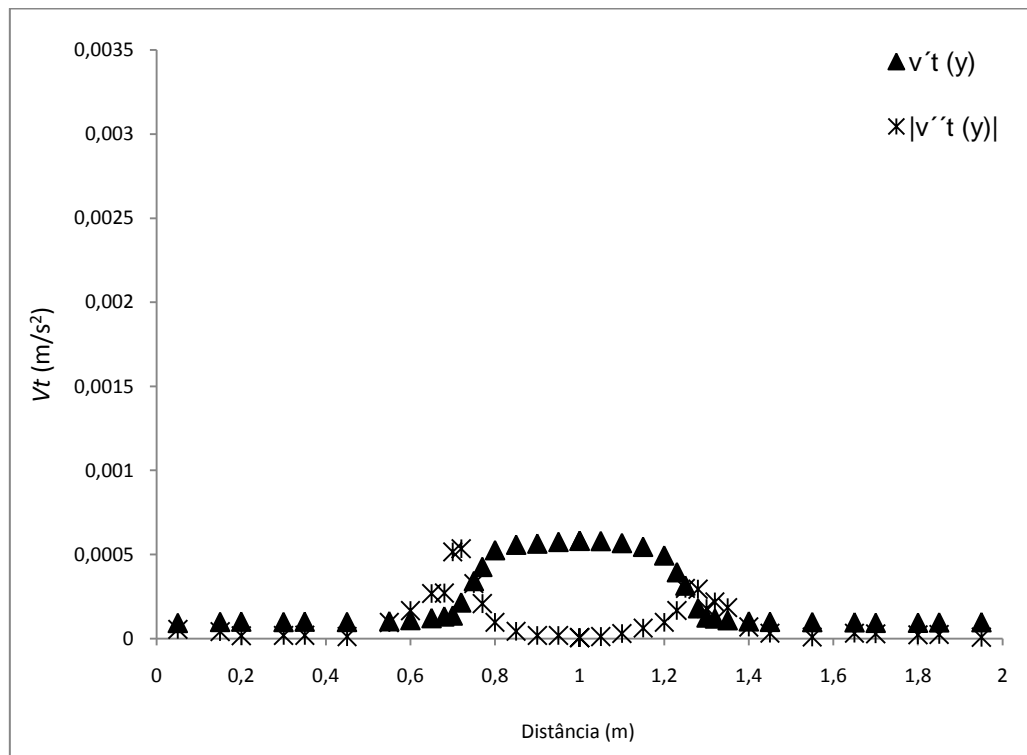
As Figuras 93, 94, 95 e 96 mostram a distribuição transversal nas secções X 7500 das duas componentes de turbulência de  $v_t$  para as quatro situações de escoamento em estudo.

Os resultados permitem concluir que a componente da viscosidade turbulenta devida à turbulência gerada pelo leito  $v'_t$  é praticamente igual para todos os ensaios, isto é, independente da altura relativa e da rugosidade. Por outro lado, a componente devida à turbulência gerada na camada de mistura, apresenta maiores valores para  $h_r=0,15$  e fundo liso, diminuindo depois com a altura relativa e com o aumento da rugosidade dos leitos de cheia. Este comportamento deve estar relacionado com o aumento da intensidade da turbulência gerada pelo fundo, o que por sua vez deve limitar o desenvolvimento da camada de mistura e da turbulência causada por esta.



**Figura 93 - Distribuição transversal de  $v'_t$  e  $v''_t$  em X 7500 –  $h_r=0,15$  Liso**





**Figura 96 - Distribuição transversal de  $v'_t$  e  $|v''_t|$  em X 7500 –  $h_r=0,30$  Rugoso**

#### **4.6. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO APARENTE NA INTERFACE**

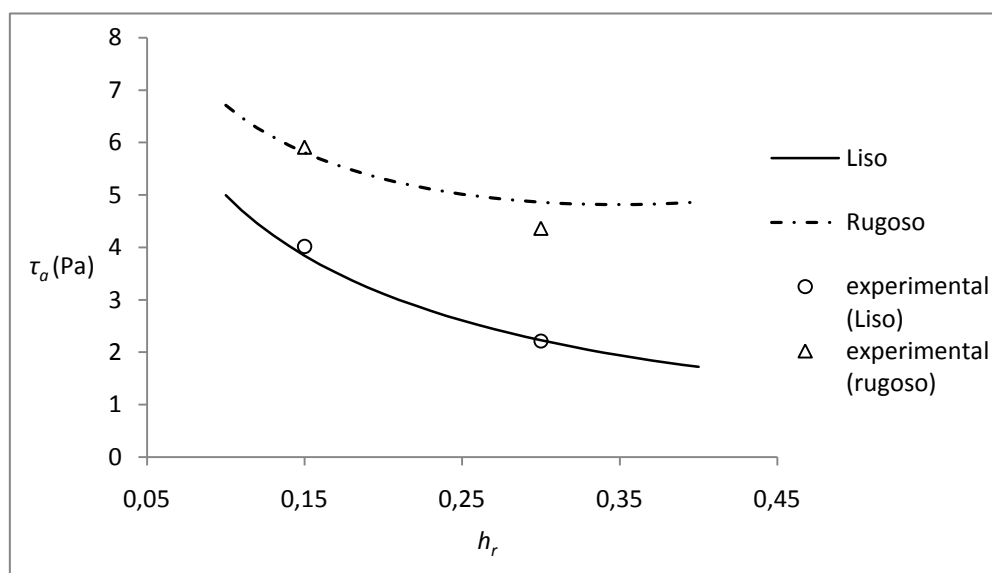
O valor da tensão aparente  $\tau_a$  na interface foi determinado pela diferença entre a força gravítica e as forças de atrito em ambos os leitos (Knight e Demetriou, 1983) conforme descrito no subcapítulo 2.2.1. Estando já determinadas as tensões de arrastamento  $\tau_0$ , foram calculadas as tensões aparentes para as quatro situações de escoamento estudadas, sendo apenas apresentados os resultados na secção X 7500 nos Quadros 29 e 30 apresentados em anexo.

As tensões aparentes determinadas com base nos valores de  $\tau_0$  obtidos através das velocidades medidas experimentalmente, foram comparados na Figura 97 com os valores calculados para as mesmas condições de escoamento, através das expressões sugeridas por Moreta e Martin-Vide (2010), Eq. (28) e Eq. (29) anteriormente apresentadas.

Os valores determinados pelos dois métodos são muito próximos para  $h_r=0,15$  quer sejam em leitos de cheia lisos ou leitos rugosos. No caso de  $h_r=0,30$  são praticamente

coincidentes em fundo liso, sendo que em fundo rugoso os resultados experimentais de  $\tau_a$  estão ligeiramente abaixo dos encontrados por Moreta e Martin-Vide (2010).

Saliente-se que as equações de Moreta e Martin-Vide (2010) resultaram da regressão linear aplicada aos dados do FCF. No caso de fundo rugoso, os ensaios do FCF não tinham relva artificial nos leitos de cheia, mas sim um conjunto de cilindros. Deste modo o tipo de rugosidade é exactamente semelhante ao utilizado no presente estudo, sendo previsível que os resultados sejam diferentes à medida que se aumenta a altura relativa, dado que nessas condições a componente de atrito (“drag”) nos cilindros passa a ter um papel importante.



**Figura 97 – Tensão aparente  $\tau_a$  - Moreta e Martin-Vide (2010)**



## 5. CONCLUSÕES

O principal objectivo desta dissertação prendeu-se com a avaliação do comportamento dos leitos de cheia rugosos face à situação de leitos lisos, ambos em situações de escoamento uniforme.

Tratando-se de um estudo experimental podem existir erros de medição por mau manuseamento dos instrumentos ou mesmo por ter sido excedida a sua precisão. No entanto durante todos os ensaios foi tido espírito crítico face a qualquer dúvida ou desvio nítido dos valores recolhidos, repetindo-se as medições para confirmação da veracidade dos registos. Foram apresentados perfis de velocidades e tensões de arrastamento em secção transversal para as secções X 3000, X 5000 e X 7500, evidenciando a semelhança entre eles para cada uma das situações estudadas. A estabilidade dos seus padrões veio confirmar a correcta execução do procedimento de imposição de regime uniforme ao canal experimental, possibilitando para cada caso a recolha de dados pretendida.

Com base nos dados recolhidos através de todos os ensaios anteriormente descritos, realizados no canal experimental, foi possível verificar pela comparação de duas alturas relativas para a situação de leitos de cheia lisos e leitos de cheia rugosos que:

- Com o aumento da altura relativa em leitos lisos, todas as velocidades aumentaram. Porém esse aumento foi mais evidente nos leitos de cheia;
- Em relação às tensões de arrastamento, com a subida da altura relativa os valores de tensão sofreram um aumento muito semelhante em toda a secção;
- Em leitos rugosos com a subida da altura relativa verificaram-se subidas assinaláveis das velocidades nos leitos de cheia;
- Em leitos rugosos com a subida da altura relativa verificou-se uma pequena descida das velocidades no leito principal;
- Para obter a mesma altura relativa com leitos de cheia em fundo liso e em fundo rugoso, os caudais impostos a montante variam. Para a altura relativa mais baixa estudada ( $h_r=0,15$ ), o caudal no leito principal apresenta uma descida de cerca de 8% da situação em fundo liso nos leitos de cheia face à situação estudada com fundo rugoso. Nos leitos de cheias a descida foi muito superior, escoando cerca de 44% menos de caudal.
- Com a passagem dos leitos de cheia lisos a rugosos foi diminuída a capacidade de vazão do canal e ao analisarem-se os valores verificou-se

uma diminuição de cerca de 13% sobre o caudal total escoado pelo canal de secção composta em leitos de cheia lisos.

- Com o aumento da altura relativa ( $h_r=0,15$  para  $h_r=0,30$ ) verificou-se uma descida de cerca de 22% no caudal do leito principal, um valor bem mais alto do que foi apurado para  $h_r=0,15$ , apensar da tendência de descida se manter.
- Com o aumento da altura relativa a tendência de descida também se manteve nos leitos de cheia, com valores da mesma ordem dos recolhidos para  $h_r=0,15$ , desta vez para menos 37% de caudal.
- Examinando os valores de caudais totais observou-se com o aumento da altura relativa, uma descida de 27% face ao caudal escoado para os leitos de cheia lisos, uma descida duas vezes maior do que a registada para  $h_r=0,15$ .
- Em leito liso e  $h_r=0,15$  a camada de mistura parece estender-se de igual modo para o leito principal e leito de cheia, diminuindo neste último no caso de leito rugoso com a mesma altura relativa.
- Tanto para fundo liso como para fundo rugoso com o aumento da altura relativa ( $h_r=0,15$  para  $h_r=0,30$ ) a camada de mistura parece estender-se mais para o leito principal do que para o leito de cheia.
- Com o aumento da altura relativa o valor da viscosidade turbulenta diminui.
- Com o aumento da rugosidade mantendo a altura relativa o valor da viscosidade turbulenta diminui.
- A componente  $\nu'_t$  da viscosidade turbulenta é independente da altura relativa e da rugosidade.

No seguimento do trabalho desenvolvido nesta dissertação, era importante a confirmação de alguns valores e tendências que se afirmam, pelo que se recomenda:

- A realização de estudos para mais alturas relativas com fundo liso e rugoso
- Alteração da rugosidade dos leitos de cheia e estudar as mesmas alturas relativas, comparando os dados com os recolhidos nesta dissertação;
- Imposição de regime não uniforme, para as variações de percentagens de incremento já estudadas por Pinto (2010) e Teixeira (2011), com leitos de cheia rugosos;
- Estudo de diferentes variações das percentagens de incremento para regime não uniforme;
- Estudar a ocupação dos leitos de cheia por elementos verticais;



## 6. BIBLIOGRAFIA

1. ALLEN, D.; AMOS, W.; CHARTRAND, M.; GIBSON, H.; LEES, R.; LEUTSCHER, A. - *Ao encontro da Natureza*. 1ª Edição, Selecções Reader's Digest. Lisboa (1978).
2. BLANCHON, F.; CLUZAN, S.; DEMOULE, J-P.; GLASSNER, J-J.; KOENIG, V.; MINIOU, J-P.; PICARD, M.; VANDER, J. - *Primeiras Civilizações – Desde a Origem a 970 a.C..* Colecção História do Mundo. Selecções Reader's Digest. Lisboa (1996).
3. BOUSMAR, D.; RIVIÈRE, N.; PROUST, S.; PAQUIER, A.; MOREL, R.; ZECH, Y. - *Upstream discharge distribution in compound-channels flumes*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, págs. 408-412 (2005).
4. CARDOSO, António - *Hidráulica fluvial*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa (1998).
5. CHAPRA, Steven – *Applied Numerical Methods with Matlab for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill, Nova Iorque (2006)
6. CHOW, Ven Te - *Open Channel Hydraulics*. MacGraw-Hill, New York (1959).
7. Directiva 2007/60/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONCELHO – *Jornal Oficial da União Europeia*, Outubro de 2007.
8. GRAF, W.; ALTINAKAR, M. - *Fluvial Hydraulics, Flow and transport processes in channels of single geometry*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester (1998).
9. HOLLINGSHEAD, A.; RAJARATNAM, N. - *A calibration chart for the preston tube*. Journal of Hydraulic Research, Volume 18, n.º 4, págs. 313-326 (2010).
10. KNIGHT, D.; DEMETRIOU, J. - *Flood plan and main channel flow interaction*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 109, n.º 8, págs 1073-1092 (1983).
11. KNIGHT, D.; HAMED, M. - *Boundary shear in symmetrical compound channels*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 110, n.º 10, págs. 1412–1430 (1984).
12. KNIGHT, D.; SELLIN, R. - *The SERC flood channel facility*. Journal of the Institution of Water & Environmental Management, Volume 41, n.º 4, págs. 198–204 (1987).
13. KNIGHT, D.; SHIONO, K. - *Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel*. P. Novak (Eds). Journal of Hydraulic Research, Volume 28, n.º 2. International Association for Hydraulic Research (1990).

14. KNIGHT, Donald - *Conveyance in 1-D river models – Scoping study on reducing uncertainty in river flood conveyance* (2001).
15. LAMBERT, M.; SELLIN, R. - Velocity distribution in a large-scale model of a doubly meandering compound channel *in Proceedings of the ICE - Water Maritime and Energy*, Volume 118 (1996).
16. LAMBERT, M.; MYERS, W. - Estimating the discharge capacity in straight compound channels *in Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy*, Volume 130, 84-94 (1998).
17. LENCASTRE, Armando - *Hidráulica Geral*. Fundação Armando Lencastre. Lisboa (1996).
18. LIU, H.; ZHOU, J.; BURROWS, R. – *Numerical modeling of turbulent compound channel flow using the lattice Boltzmann method*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 59, págs 753-765 (2009).
19. MASSEY, Bernard - *Mecânica dos Flúidos*. 6ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa (2002).
20. MORETA, P.; MARTIN-VIDE, J. – *Apparent friction coefficient in straight compound channels*. Journal of Hydraulic Research, Volume 48, nº 2, págs 169-177 (2010).
21. MYERS, William - *Momentum transfer in a compound channel*. Journal of Hydraulic Research, Volume 16, n.º 2, págs. 139–150 (1978).
22. NEZU, I.; NAKAGAWA, H. - *Turbulence in Open-Channel Flows*. Balkema (1993).
23. NEZU, Iehisa - *Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment*. Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japan (1994).
24. NEZU, I.; ONITSUKA, K.; IKETANI, K. - *Coherent horizontal vortices in compound open channel flows*. Págs. 17-32 (1999).
25. PATEL, Virendra - *Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients*. Journal of Fluid Mechanisms, Volume 23, Parte 1, págs. 185-208 (1965).
26. PINTO, David – *Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciência e Tecnologia. Monte da Caparica. 113 págs. (2010).
27. POPE, Stephen - *Turbulent Flows*. 1ª edição, Cambridge University Press (2000).
28. POSEY, Chesley - *Computation of discharge including over-bank flow*. Civil Engineering. ASCE, Volume 37, n.º4, págs. 62–63 (1967).

29. PROOIJEN, B.; UIJTTEWAAK, W. – *A linear approach for the evolution of coherent structures in shallow mixing layers*. Physics of Fluids, Volume 14, Nº 12 (2002).
30. PROOIJEN, B.; BATTJES, J.; UIJTTEWAAK, W. - *Momentum Exchange in straight uniform compound channel flow*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, págs. 175-183 (2005).
31. RAJARATNAM, N.; AHMADI, R. – *Interaction between main channel and floodplains flows*. Journal of the Hydraulics Division, Volume 105, n.º 5, págs. 573-588 (1979).
32. RAMESHWARAN, P.; NADEN, P. - *Three-Dimensional Numerical Simulation of Compound Channel Flows*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 129, págs. 645-652 (2003).
33. SANJOU, M.; NEZU, I.; SUZUKI, S.; ITAI, K. - Turbulence structure of compound open-channel flows in *Proceedings of the 9th International Conference on Hydrodynamics*, Shanghai, China, 11-15 de Outubro de 2010, págs. 560-564 (2010).
34. SEBASTIAAN, N.; KELMAN, I. - *An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths*. Disasters, Volume 29, n.º 1, págs. 75-97 (2005).
35. SELLIN, Robert. - *A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that is over its floodplain*. La Houille Blanche, Volume 7, págs. 793–802 (1964).
36. SHIONO, K.; KNIGHT, D. - *Turbulent open channel flows with variable depth across the channel*. Journal of Fluid Mechanics, Volume 222, págs. 617–646 (1991).
37. SHIONO, K.; ISHIGAKI, T.; KAWANAKA, R. - Influence of one line vegetation on stage-discharge rating curves in compound channel in *Proceedings of the 33rd IAHR Congress*, Vancouver (2009).
38. STURM, Terry - *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, Water Resources and Environmental Engineering Textbook Series, New York (2001).
39. SUN X.; SHIONO K. - *Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound channel*. Advances in Water Resources, Volume 32, págs. 430-438 (2009).
40. TEIXEIRA, Eduardo – *Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciência e Tecnologia. Monte da Caparica. 89 págs (2011).
41. THORNTON, C.; ABT, S.; MORRIS, C.; FISCHENICH, J. - *Calculating shear stress at channel overbank interfaces in straight channels with vegetated floodplains*. Journal of Hydraulic Engineering, págs. 929-936 (2000).

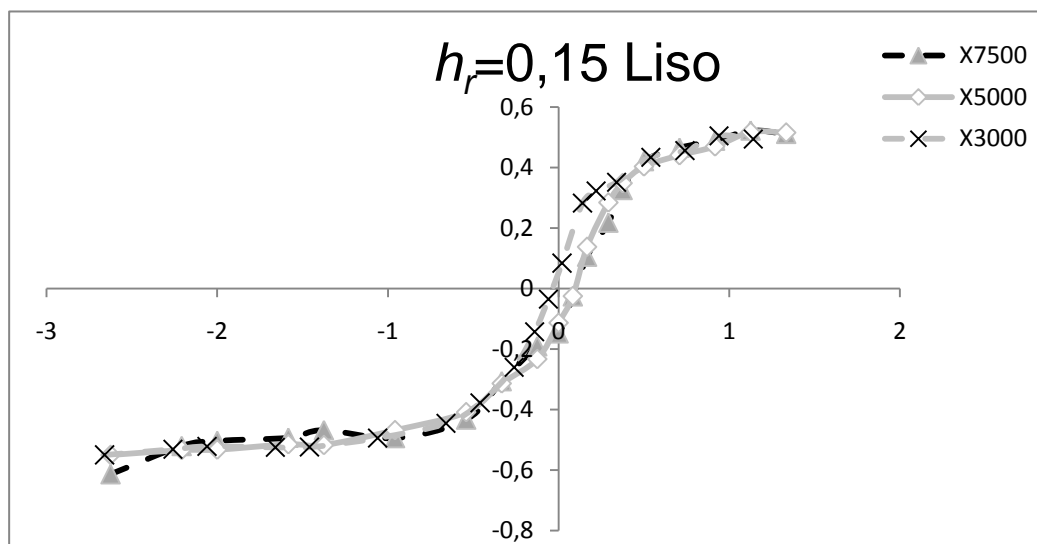
42. WU, S.; RAJARATNAM N. - *A simple method for measuring shear stress on rough boundaries*. Journal of Hydraulic Research. Volume 38, n.º 5, págs. 399-400 (2000).
43. YANG, K.; CAO, S.; KNIGHT, D. – *Flow Patterns in Compound Channels with Vegetated Floodplains*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 133, págs. 148-159 (2007).
44. YEN, Ben - *Open Channel Flow Resistance*. Journal of Hydraulic Engineering. Volume 128, págs. 20-39 (2002).
45. ZHELEZNYAKOV, Georgii. – Interaction of channel and flood plain streams *in Proceedings of the International Association for Hydraulic Research Congress*, Paris, Volume 5, págs. 144-148 (1971) (Não consultado).

Recursos online:

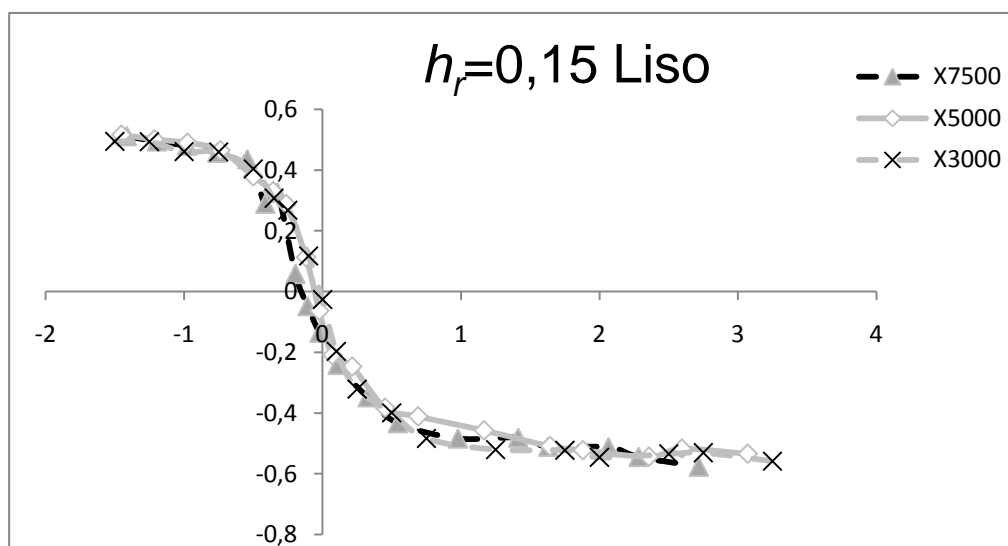
1. Universidade de Coimbra  
URL: <http://www1.ci.uc.pt/geomorf/fotos.htm> (20/01/2010)

## ANEXOS

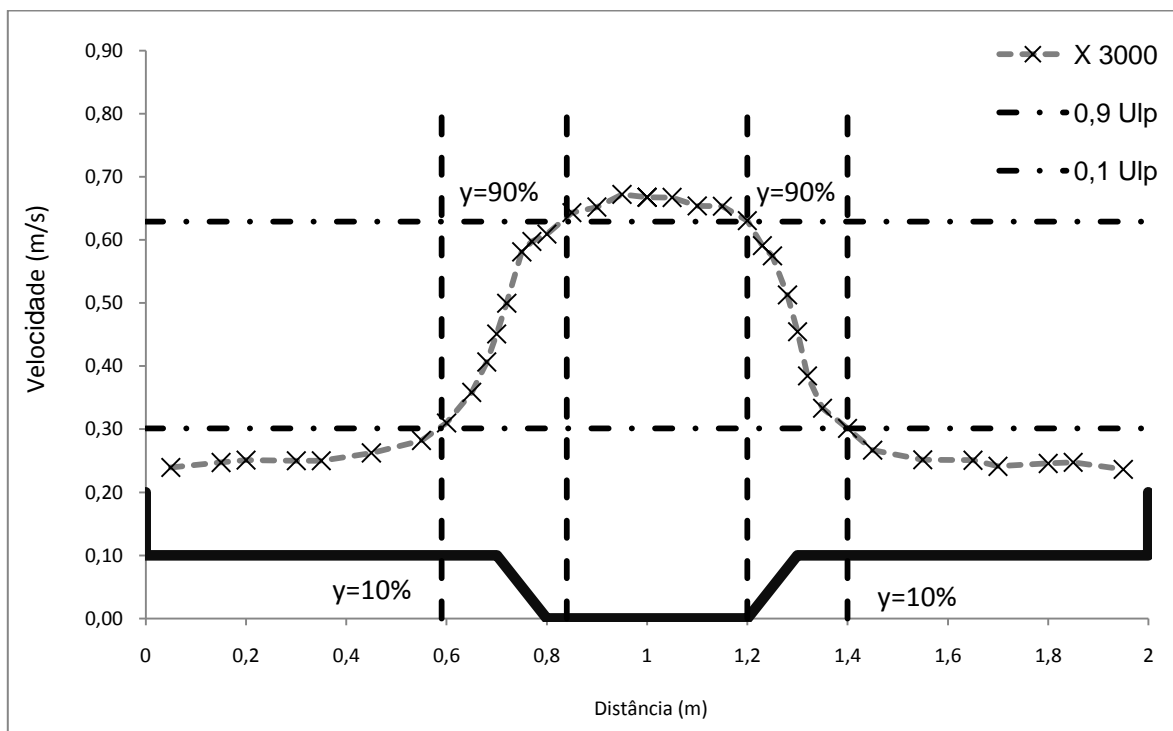
### Cálculo da espessura da Camada de Mistura pela metodologia de Pope (2000)



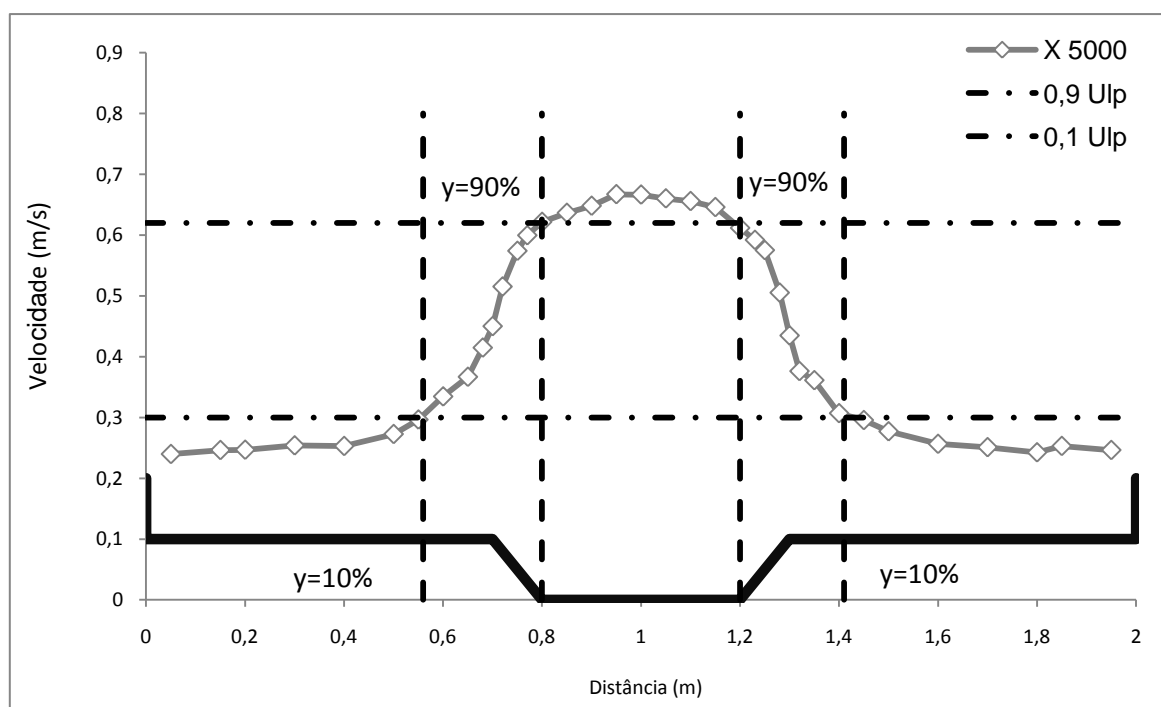
**Figura 98 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,15$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000)**



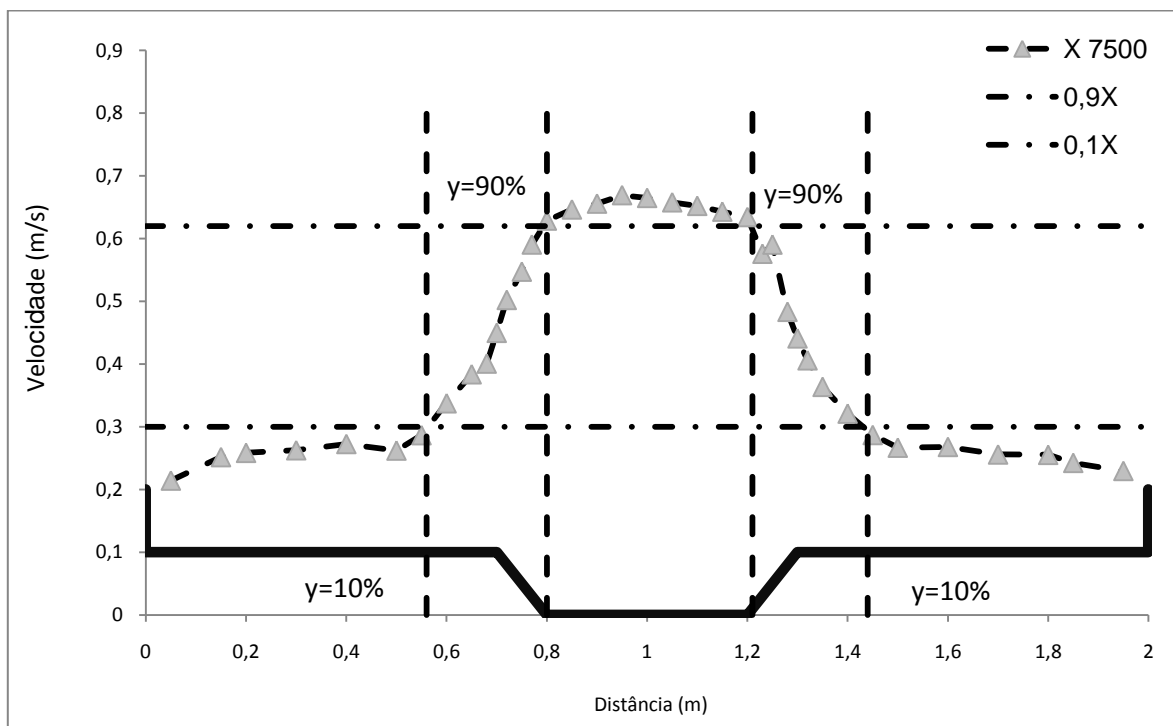
**Figura 99 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,15$  – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000)**



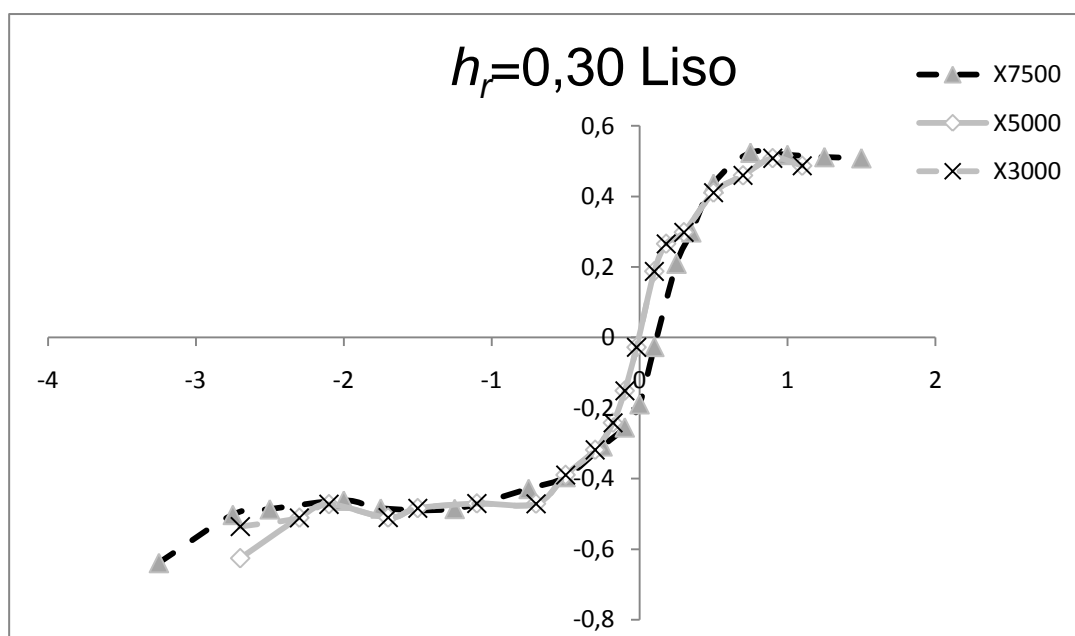
**Figura 100 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r = 0,15$  em X3000 segundo metodologia de Pope (2000)**



**Figura 101 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r = 0,15$  em X5000 segundo metodologia de Pope (2000)**



**Figura 102 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X7500 segundo metodologia de Pope (2000)**



**Figura 103 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000)**

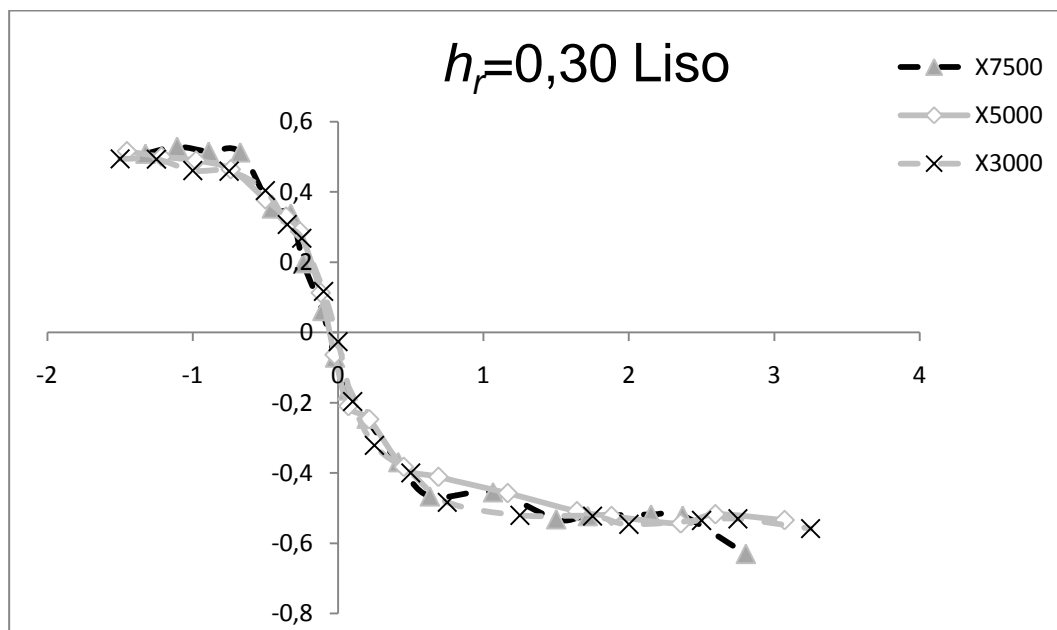


Figura 104 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000)

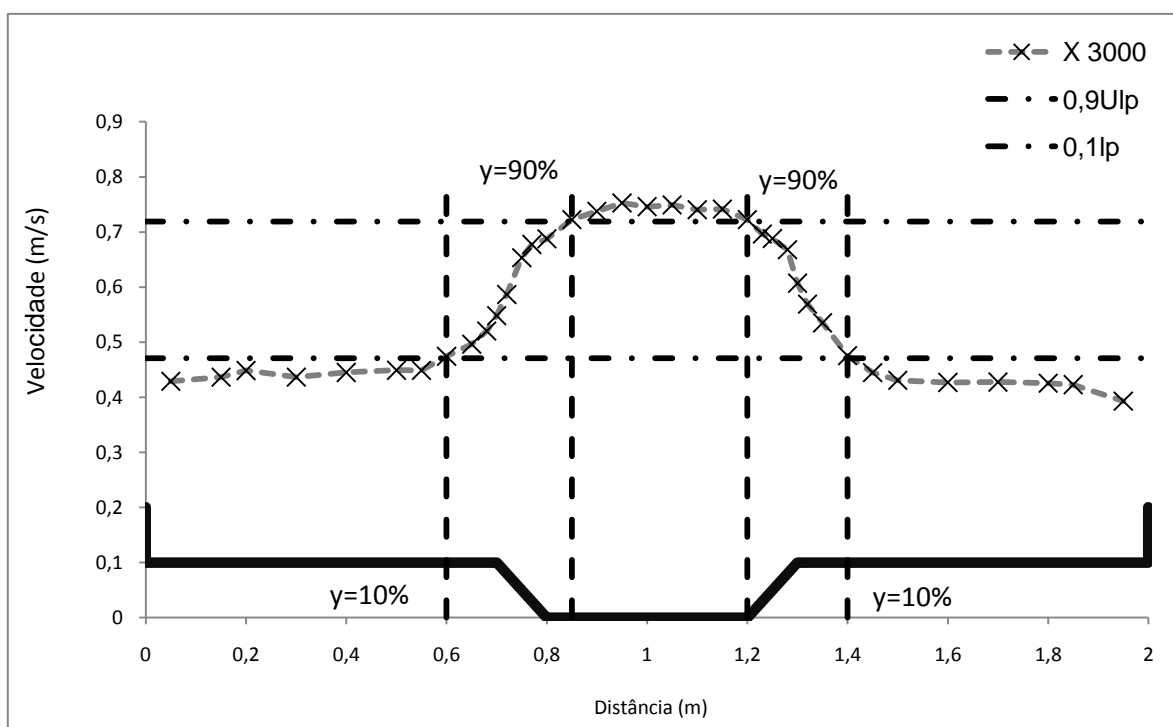
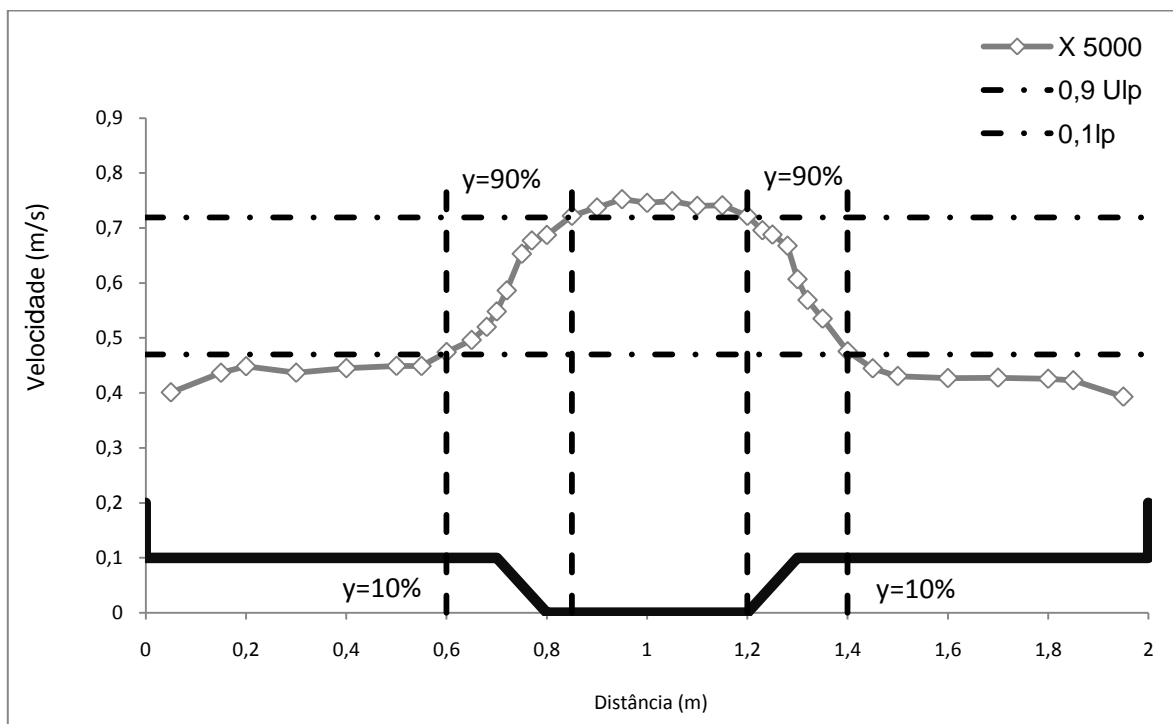
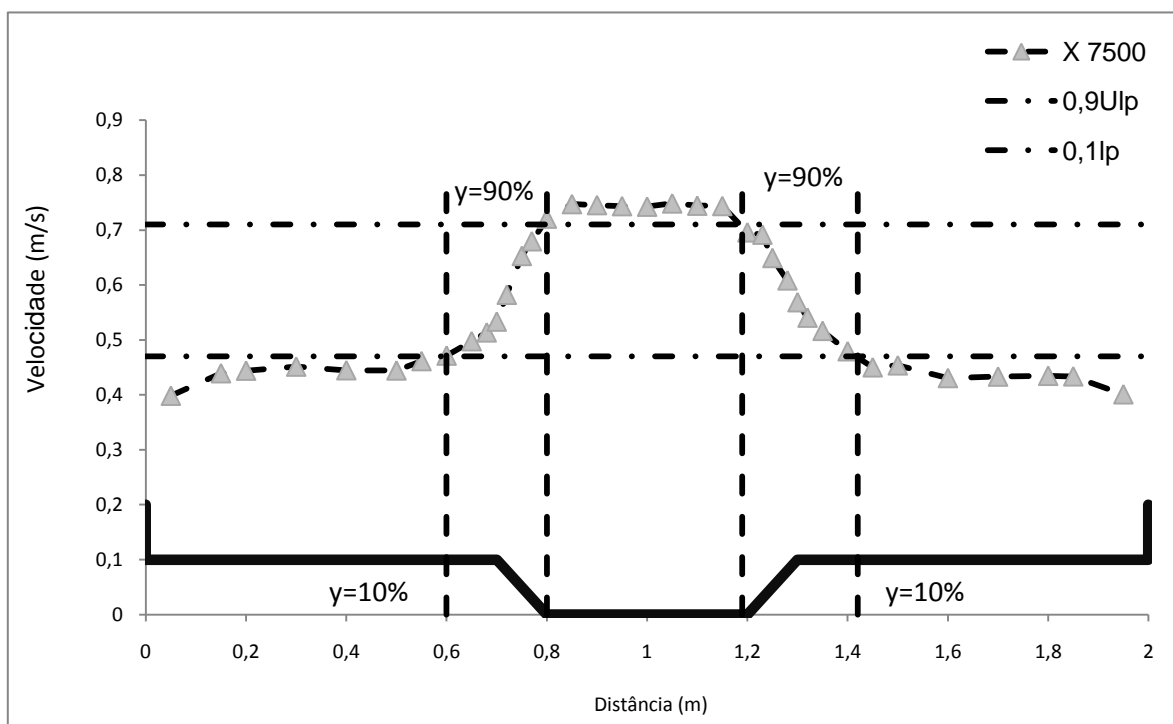


Figura 105 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X3000 segundo metodologia de Pope (2000)





**Figura 106 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X5000 segundo metodologia de Pope (2000)**



**Figura 107 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X7500 segundo metodologia de Pope (2000)**

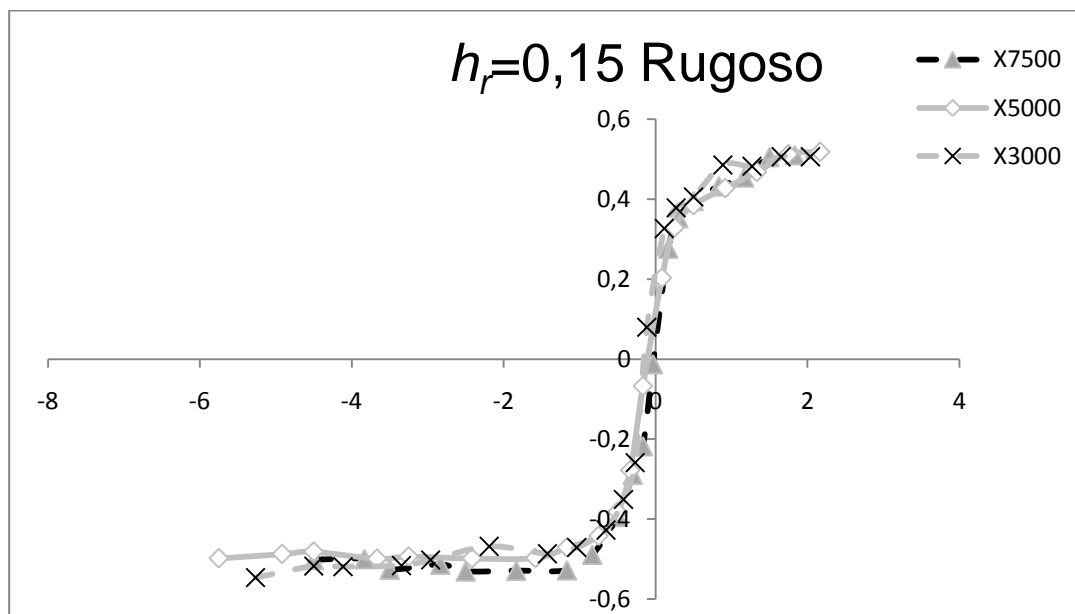


Figura 108 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,15$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000)

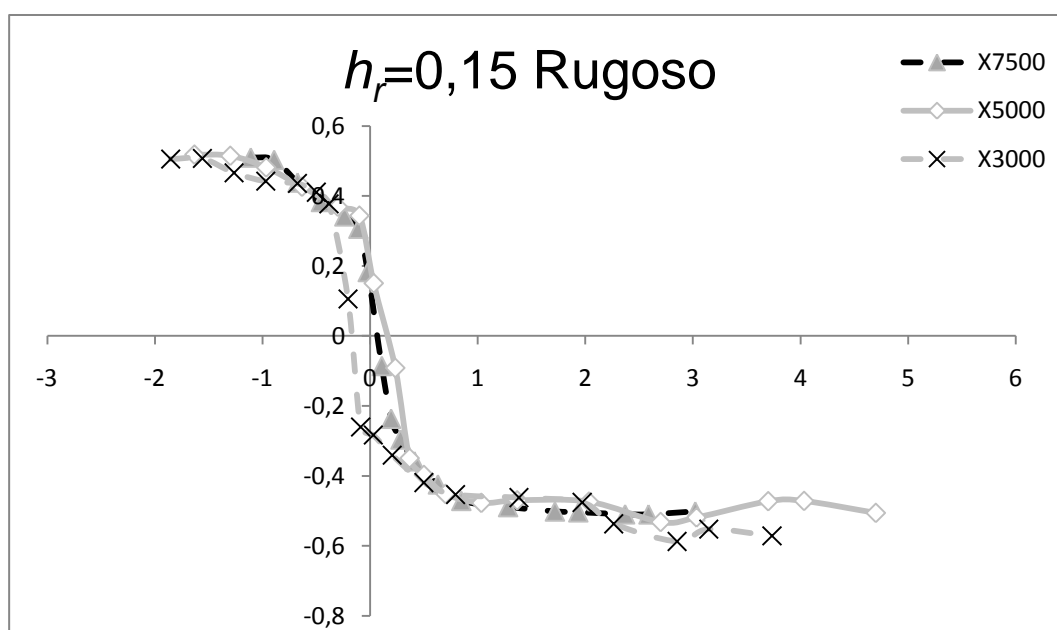


Figura 109 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,15$  – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000)

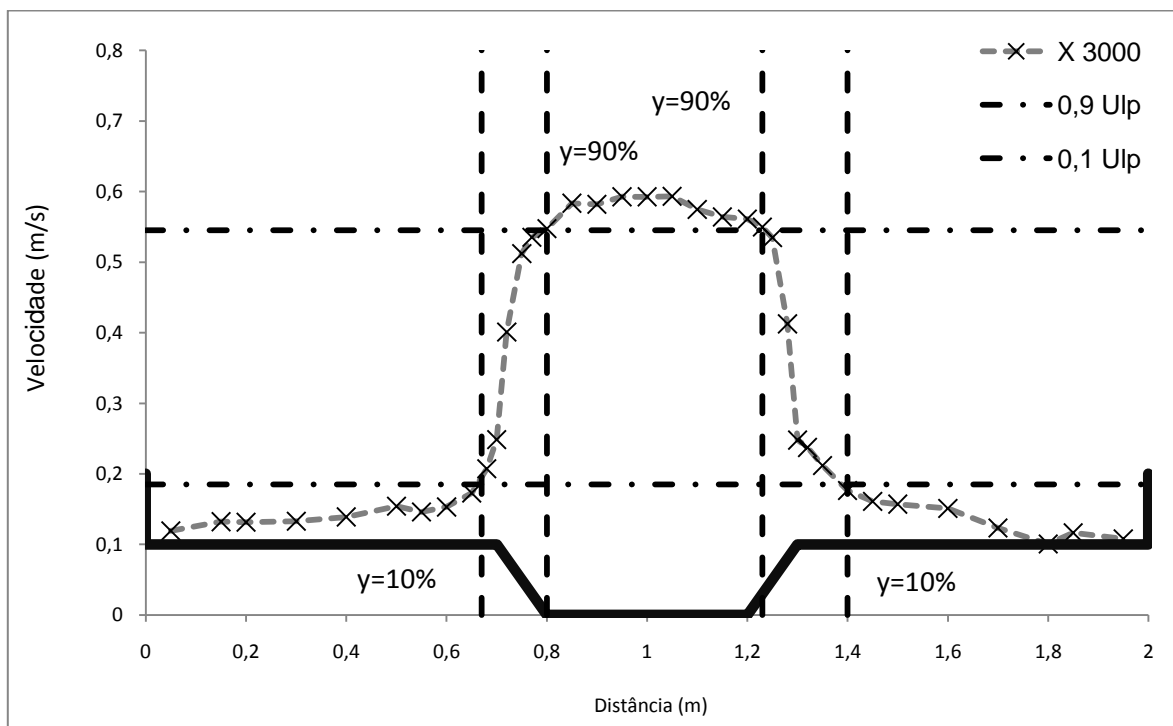


Figura 110 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X3000 segundo metodologia de Pope (2000)

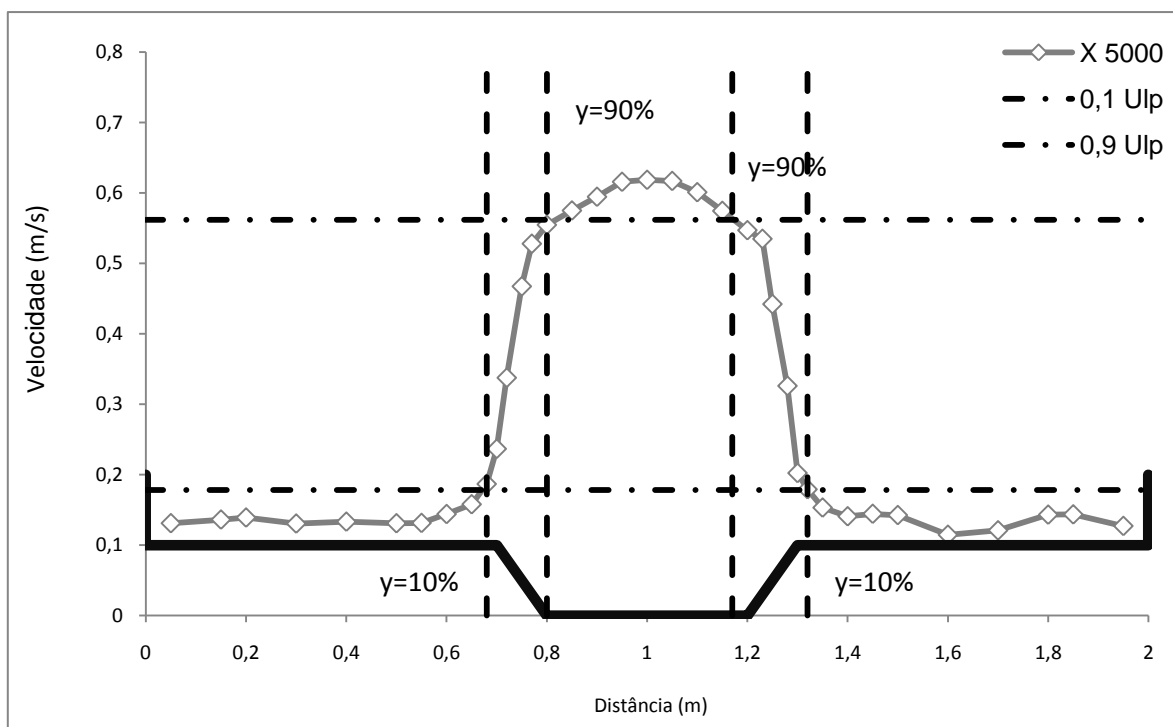
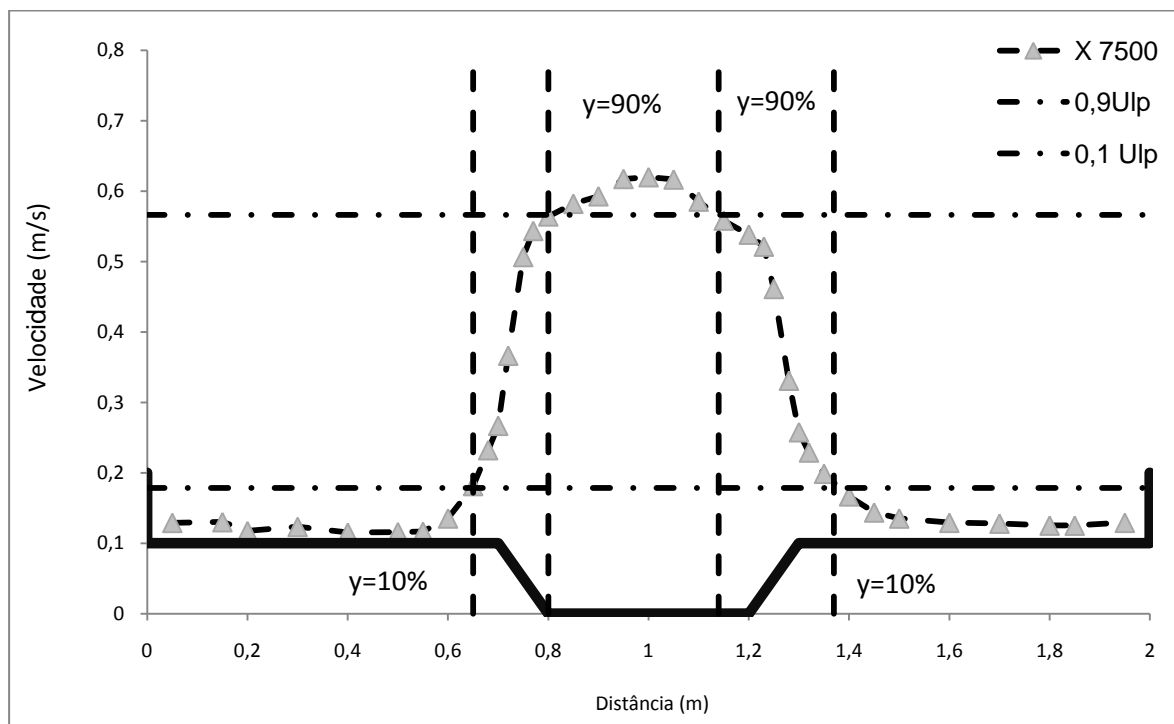
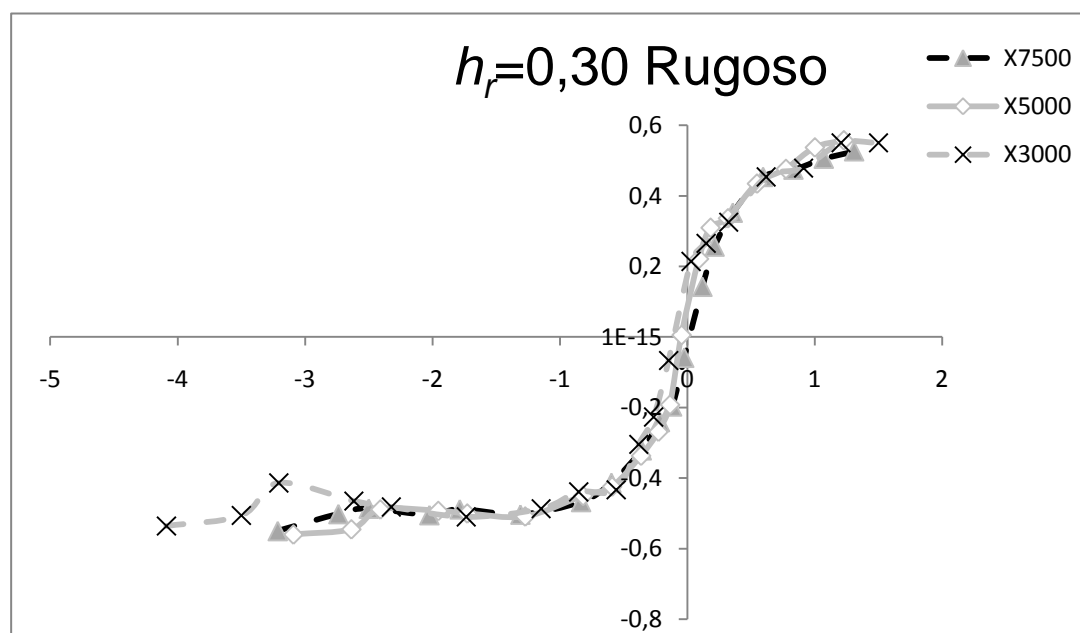


Figura 111 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X5000 segundo metodologia de Pope (2000)



**Figura 112 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X7500 segundo metodologia de Pope (2000)**



**Figura 113 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Pope (2000)**

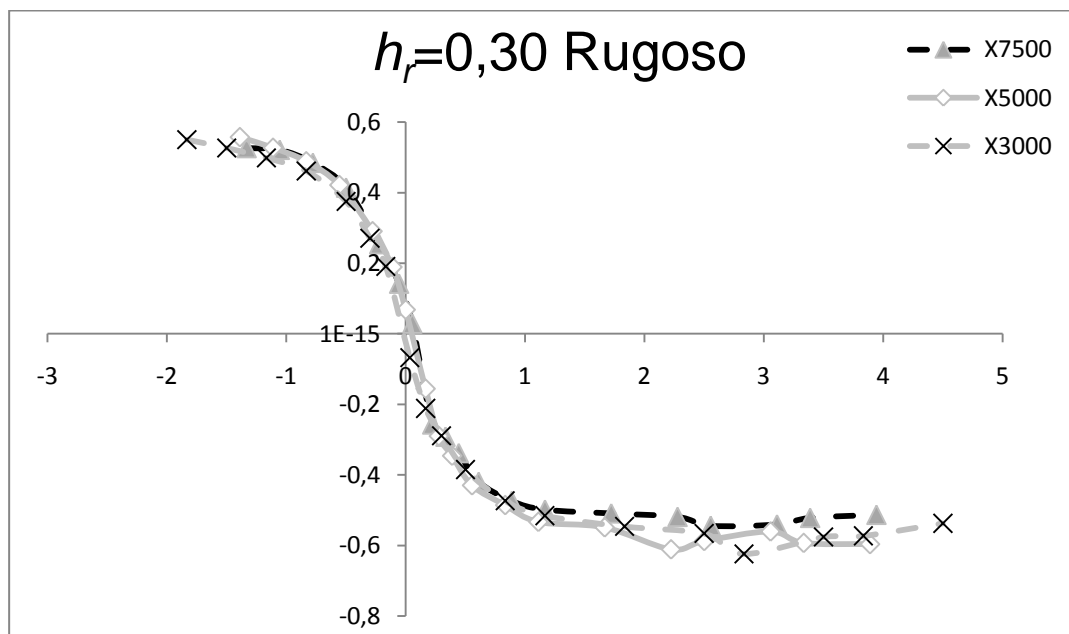


Figura 114 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos  
-  $h_r=0,30$  – Leito direito segundo metodologia de Pope (2000)

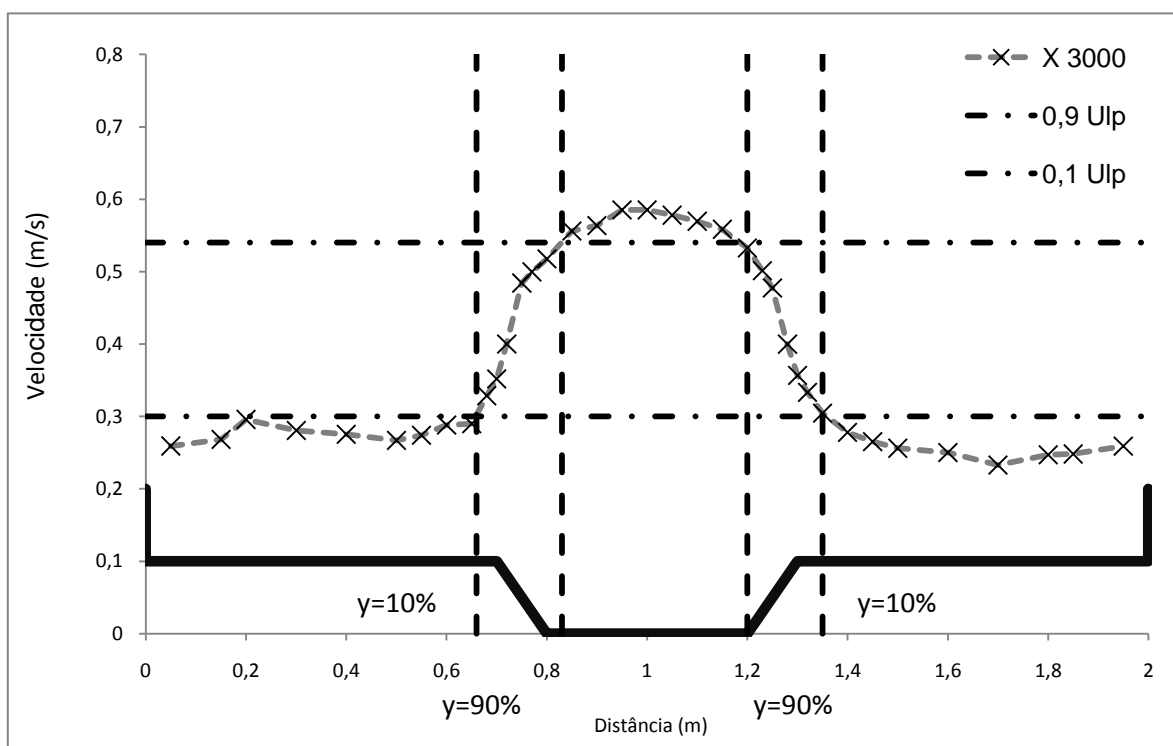
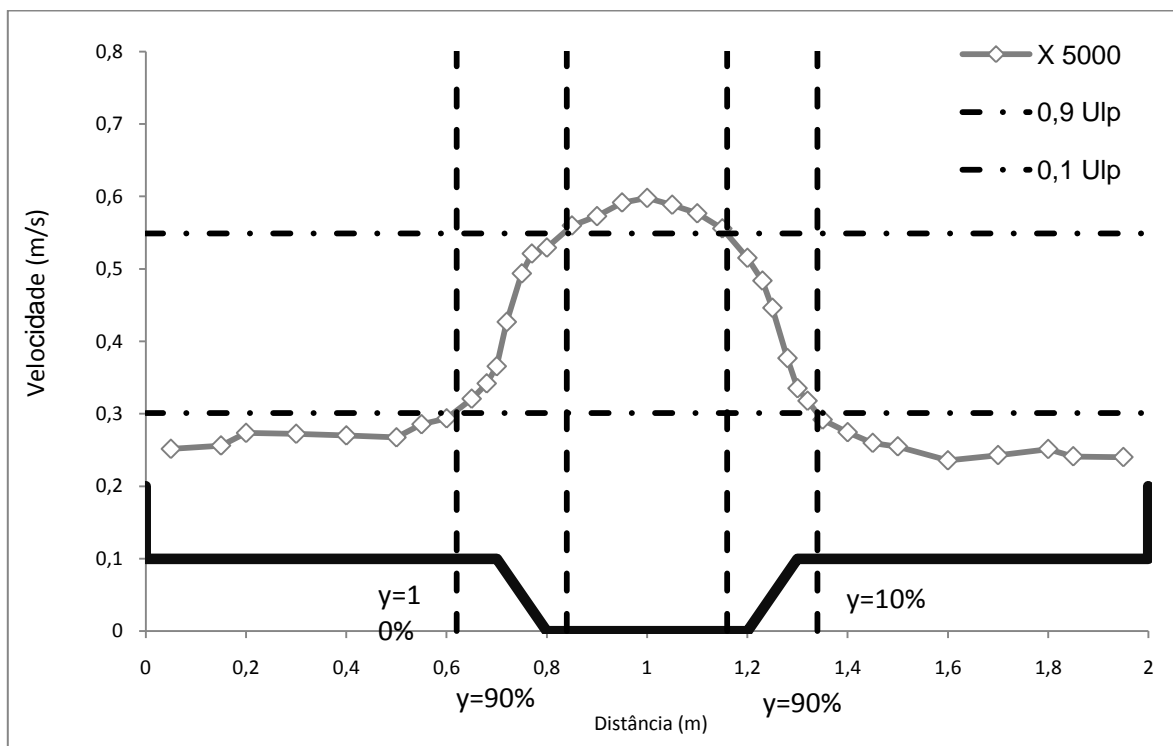
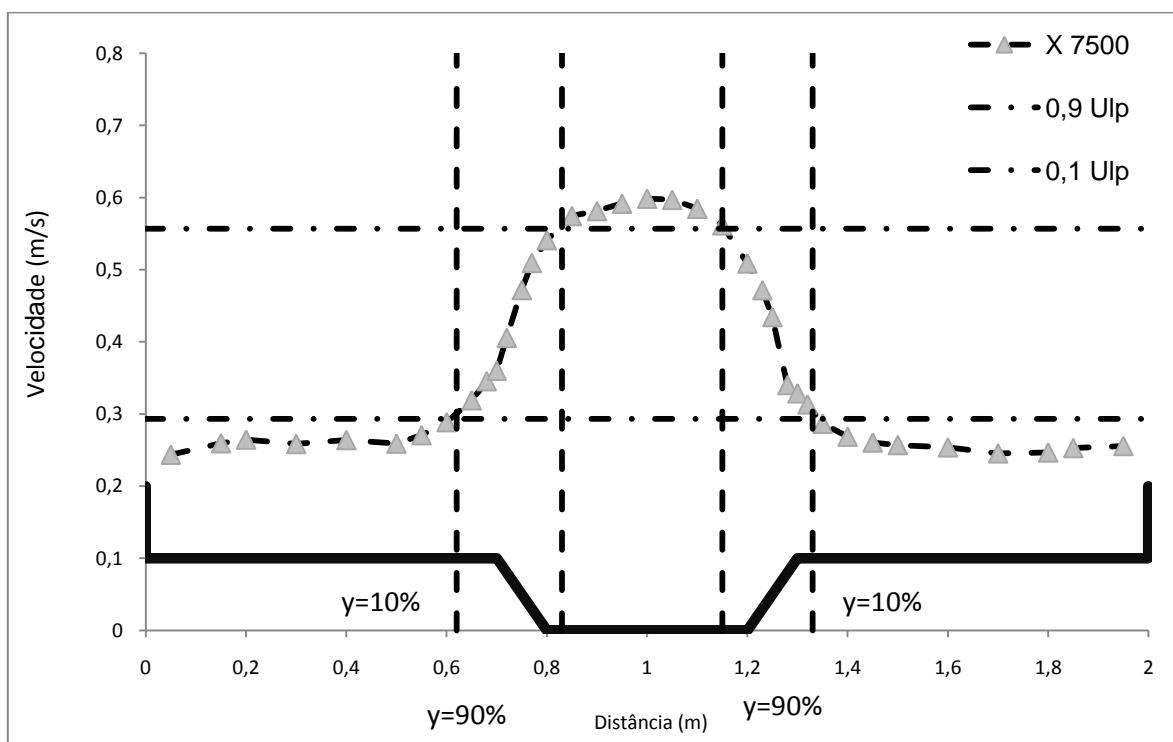


Figura 115 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X3000 segundo metodologia de Pope (2000)

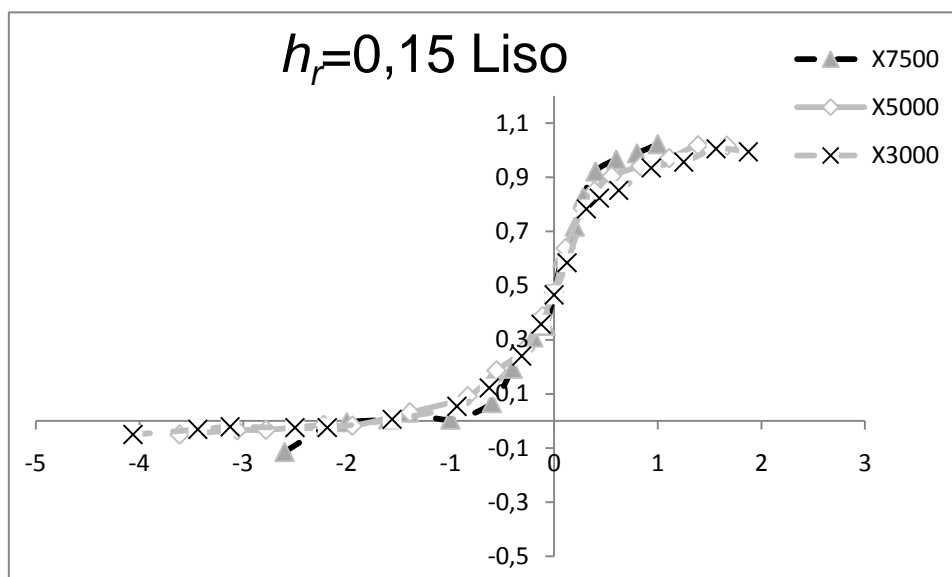


**Figura 116 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X5000 segundo metodologia de Pope (2000)**

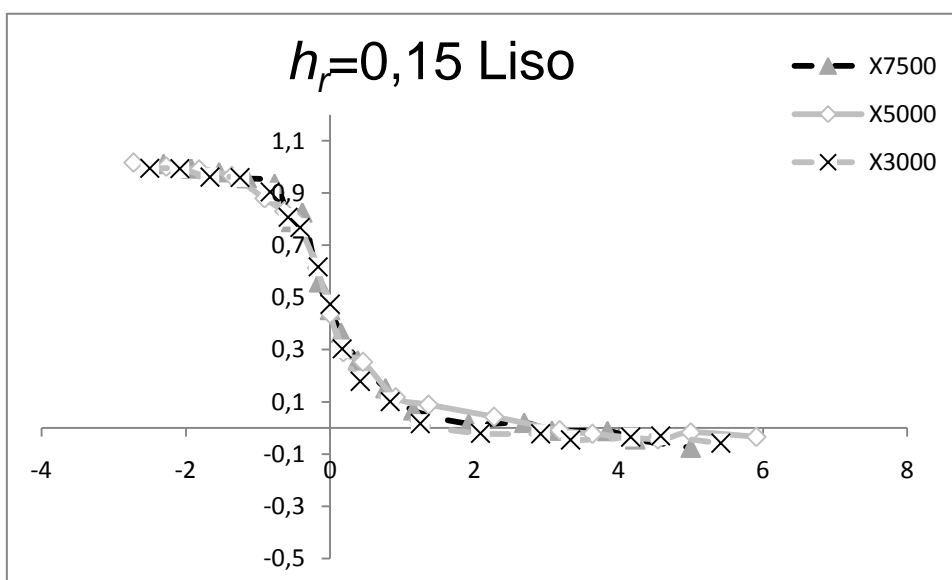


**Figura 117 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X7500 segundo metodologia de Pope (2000)**

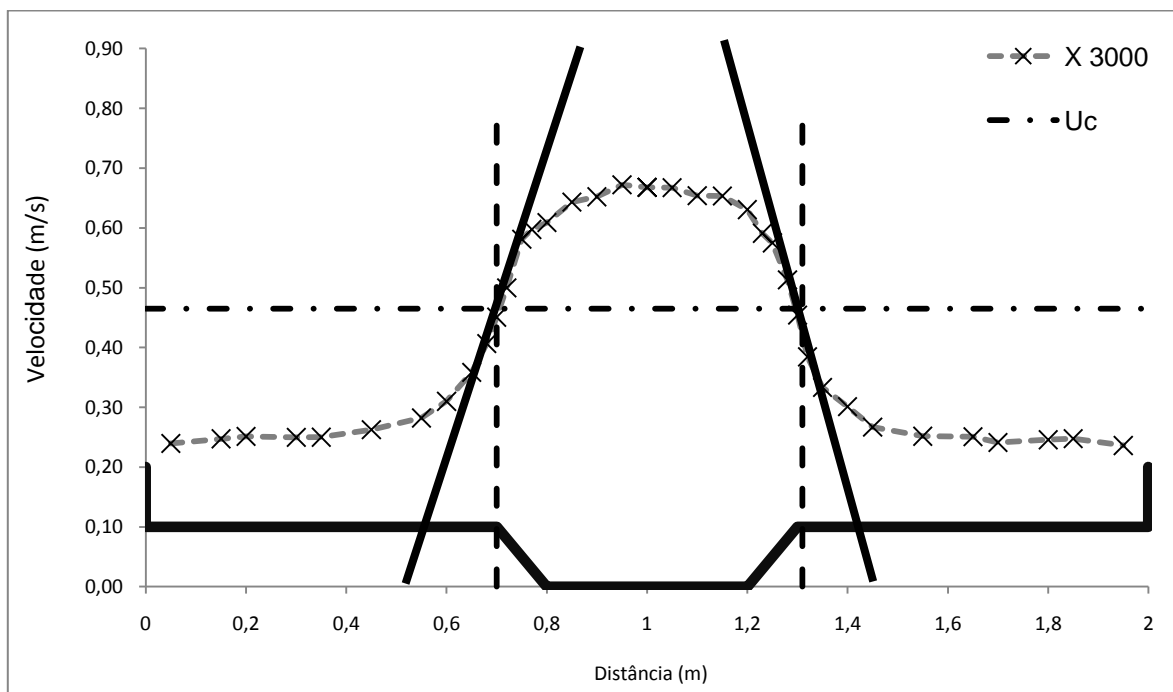
Cálculo da espessura da Camada de Mistura pela metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)



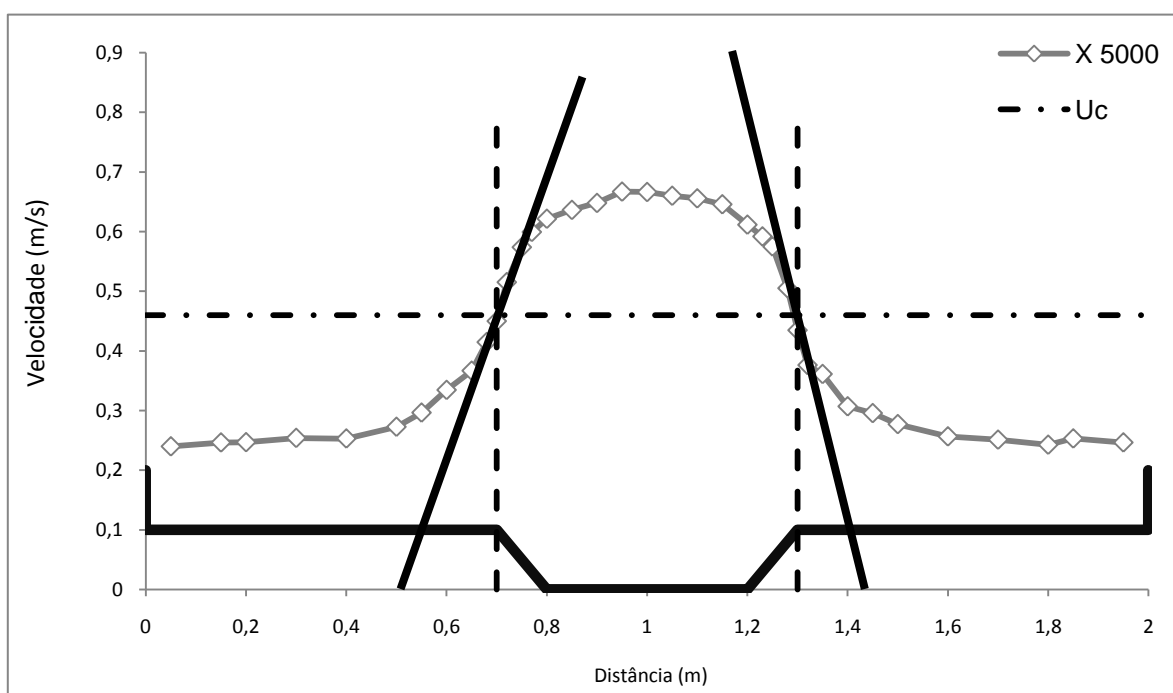
**Figura 118 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,15$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**



**Figura 119 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,15$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**



**Figura 120 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



**Figura 121 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



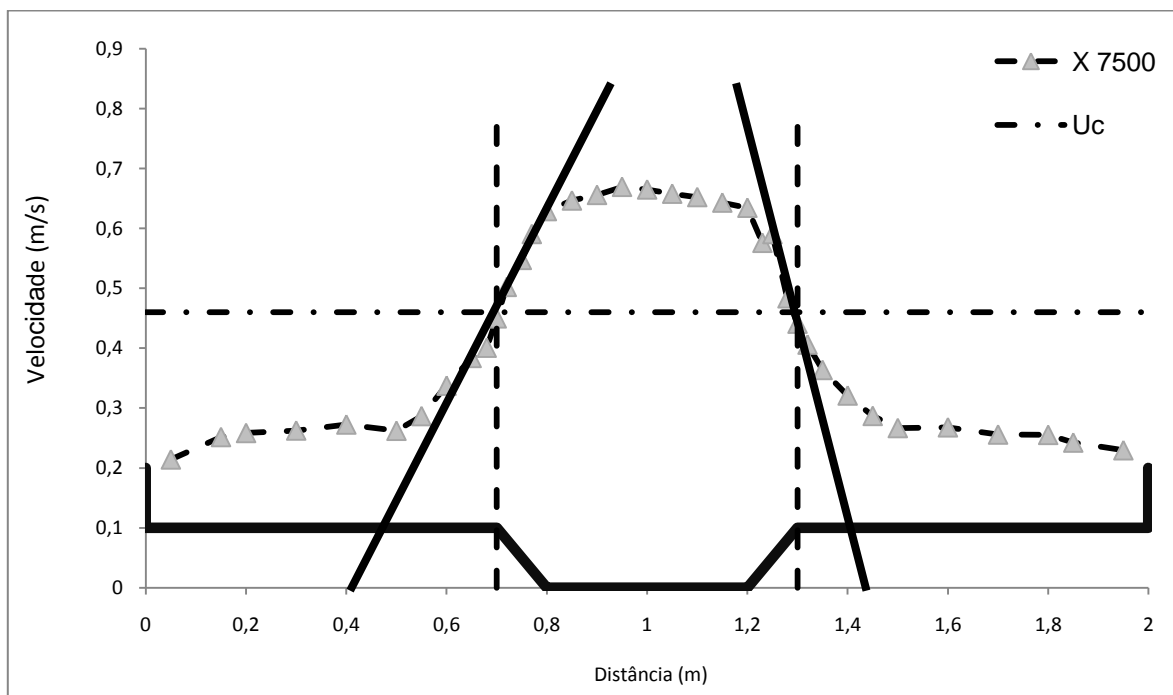


Figura 122 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)

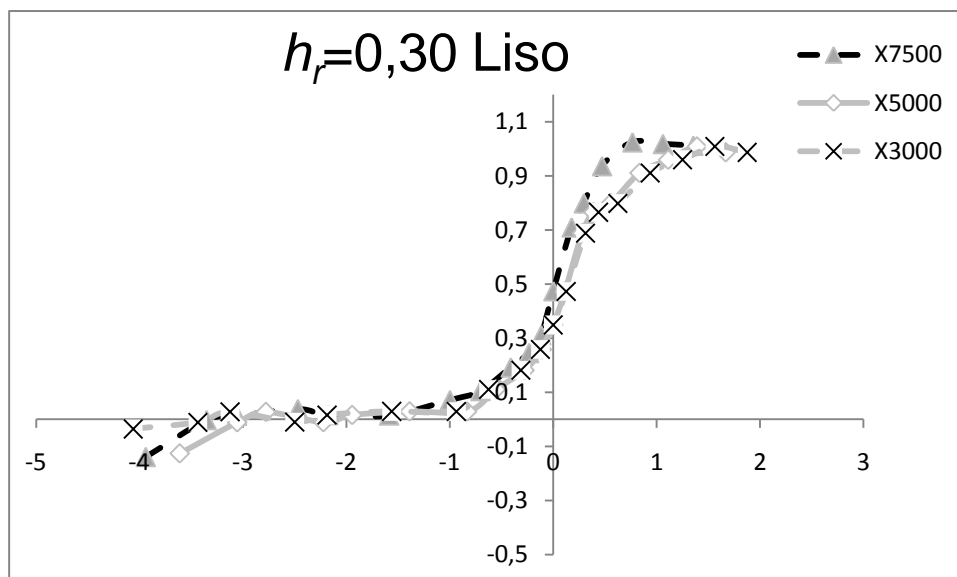
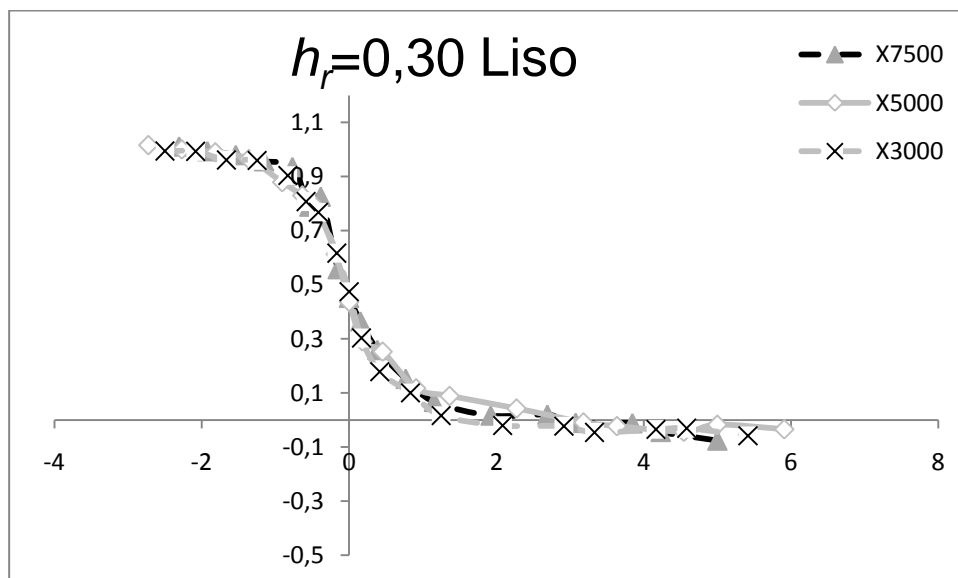
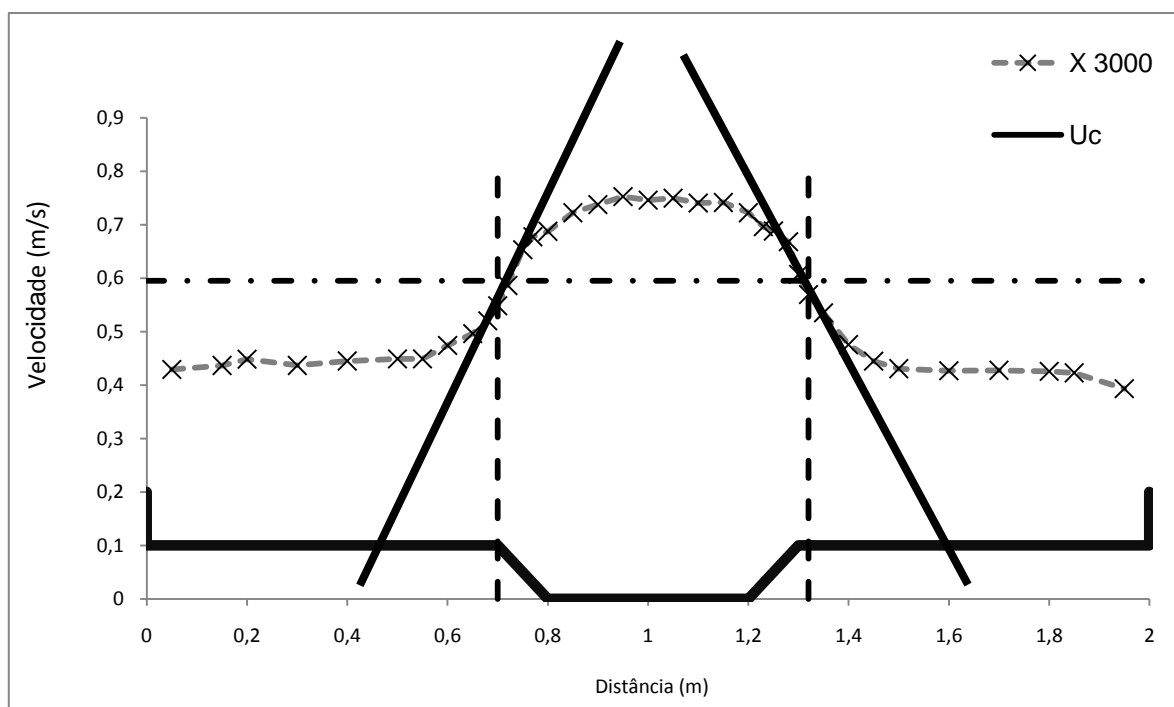


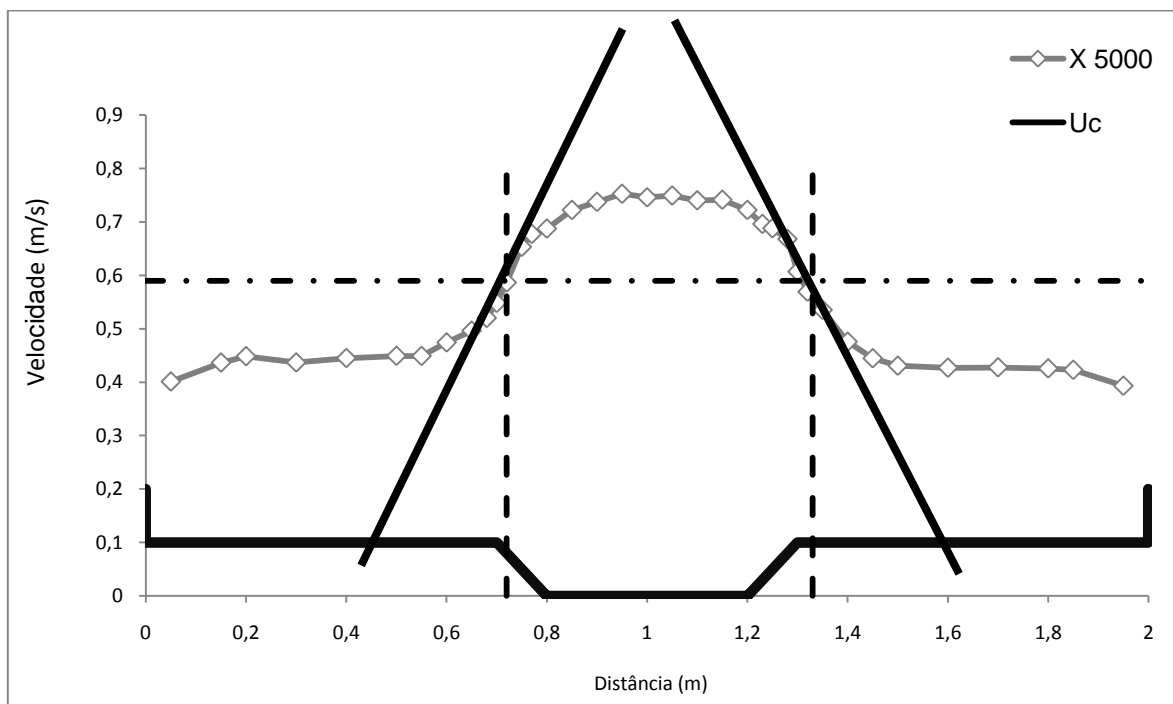
Figura 123 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)



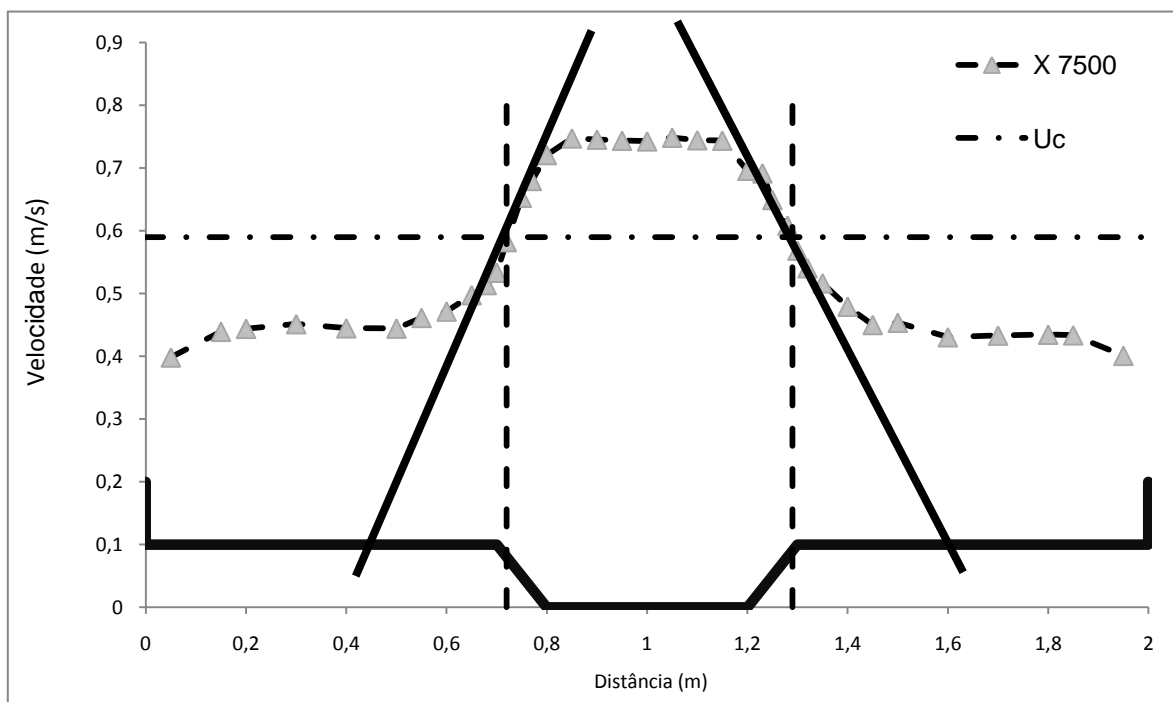
**Figura 124 - Perfil transversal de velocidades dimensionado- RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  - Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



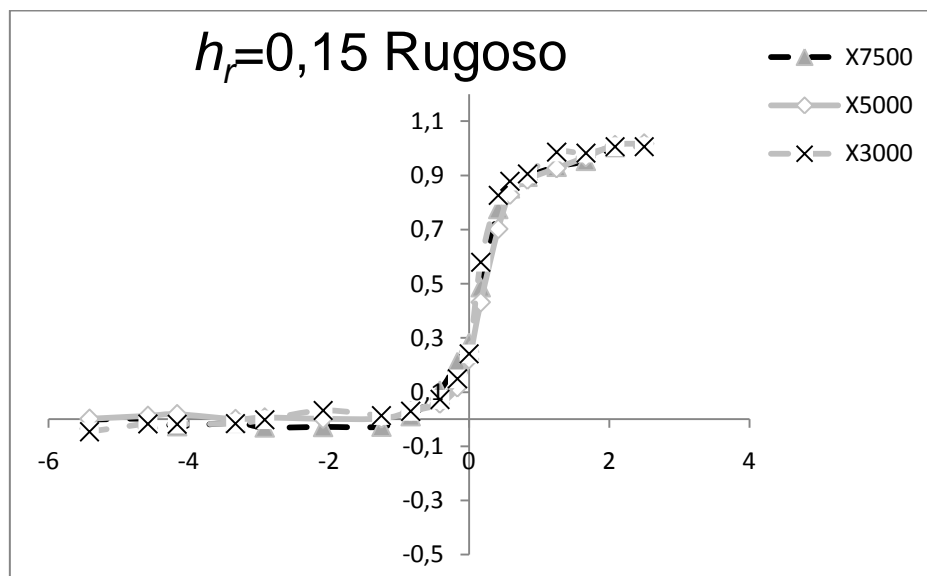
**Figura 125 - Regime uniforme com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



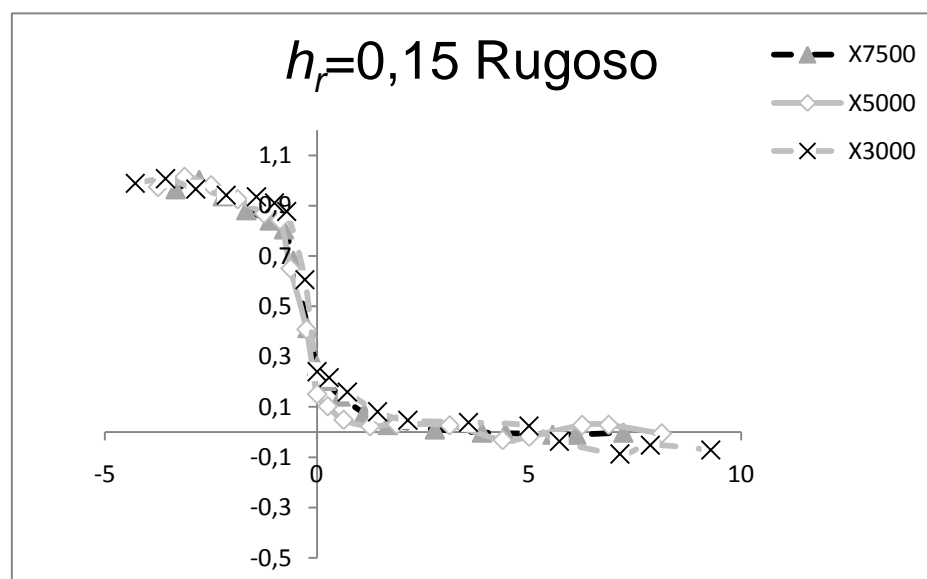
**Figura 126 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X5000 segundo metodologia de Prooijsen e Uijtewaals (2002)**



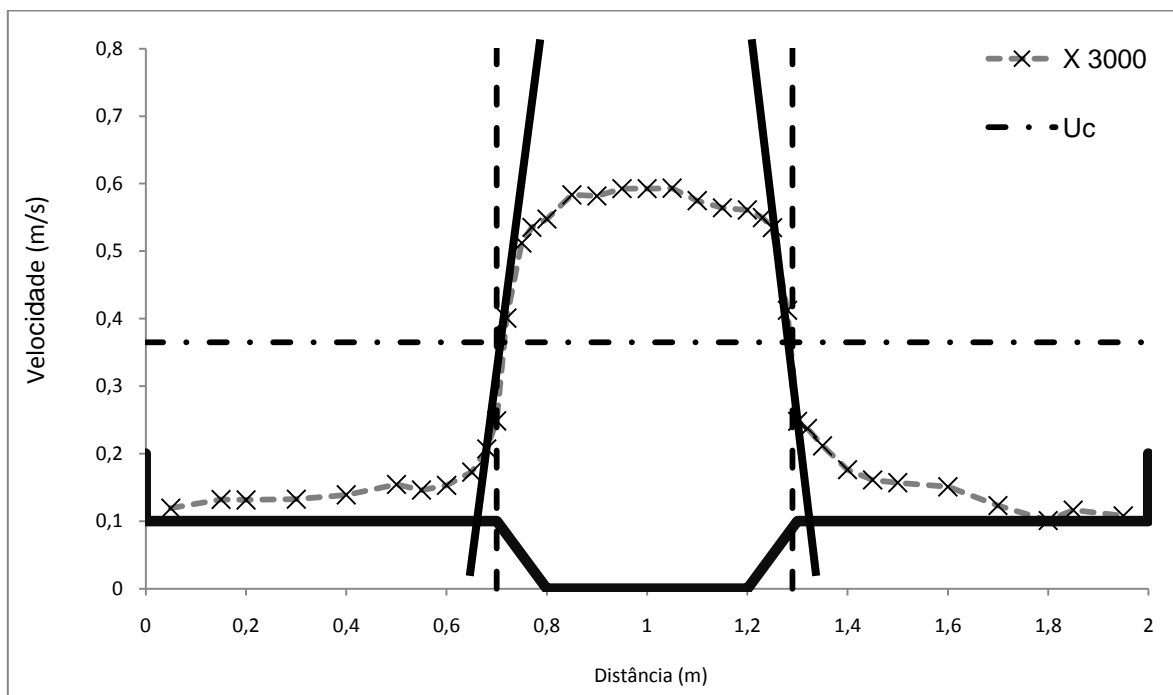
**Figura 127 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X7500 segundo metodologia de Prooijsen e Uijtewaals (2002)**



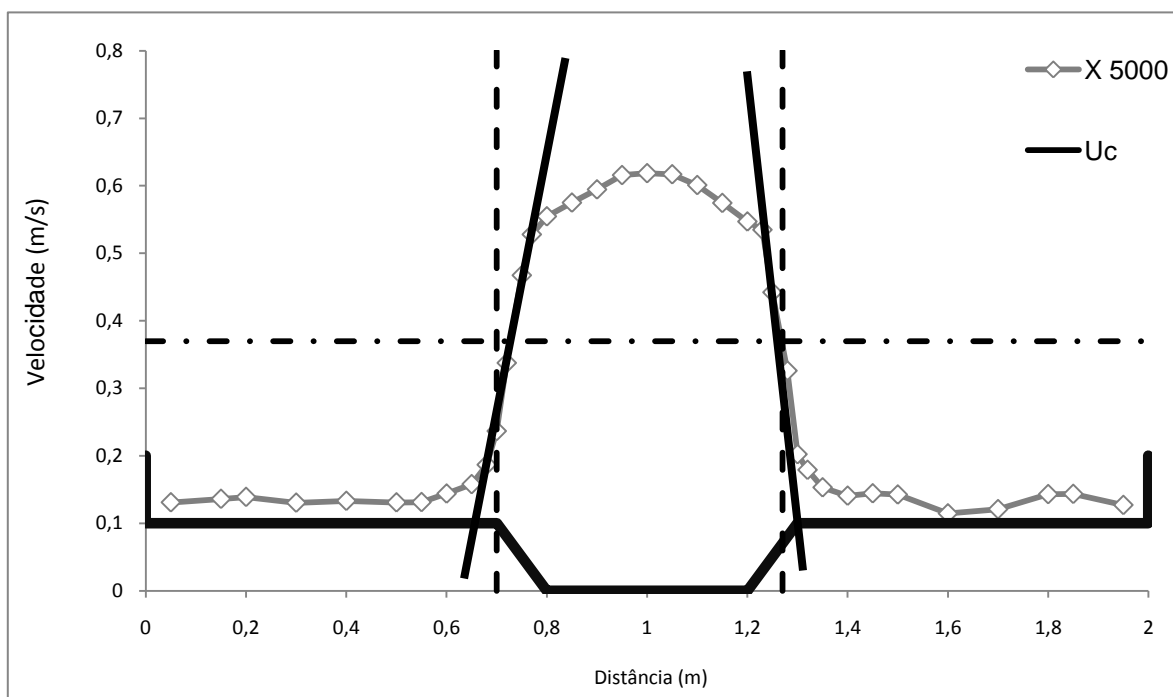
**Figura 128 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,15$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**



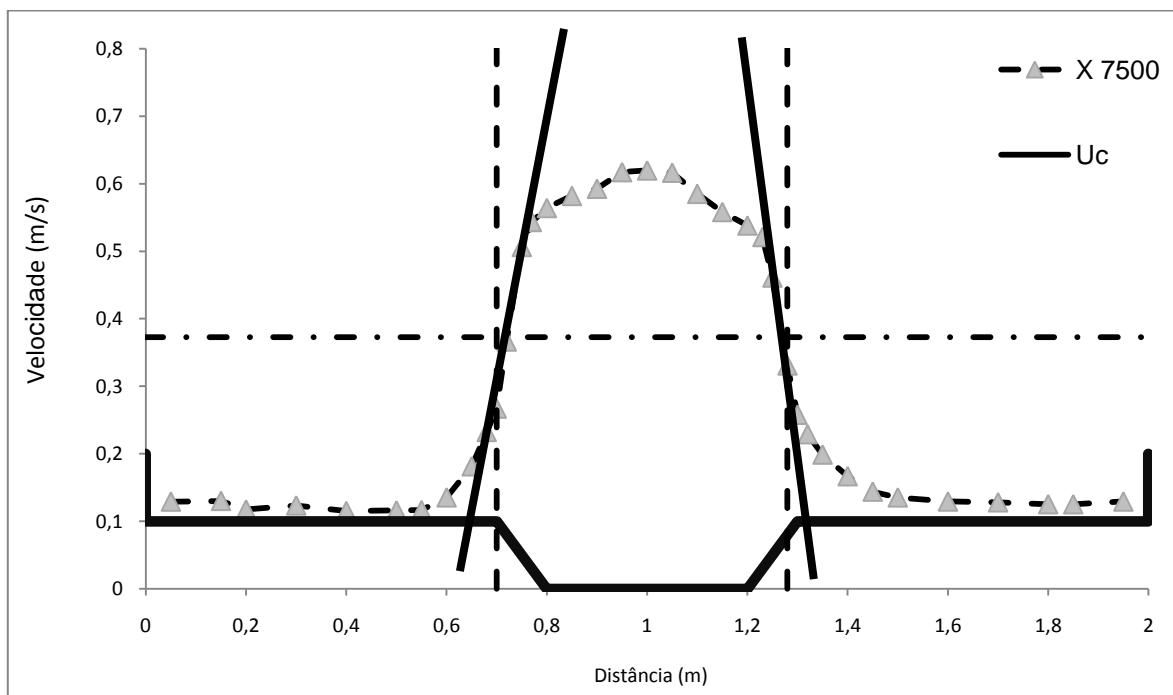
**Figura 129 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,15$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**



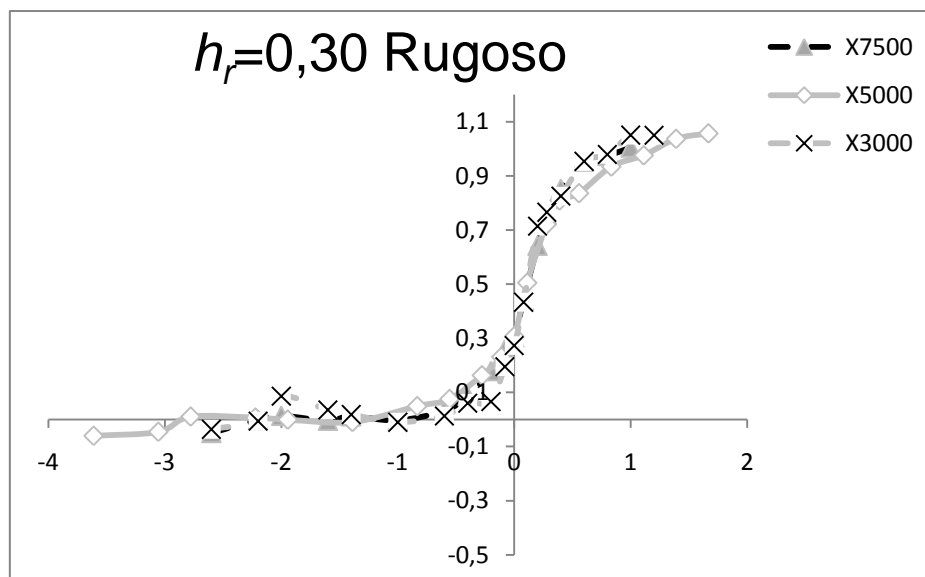
**Figura 130 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



**Figura 131 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



**Figura 132 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**



**Figura 133 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen e Uijttewaal (2002)**

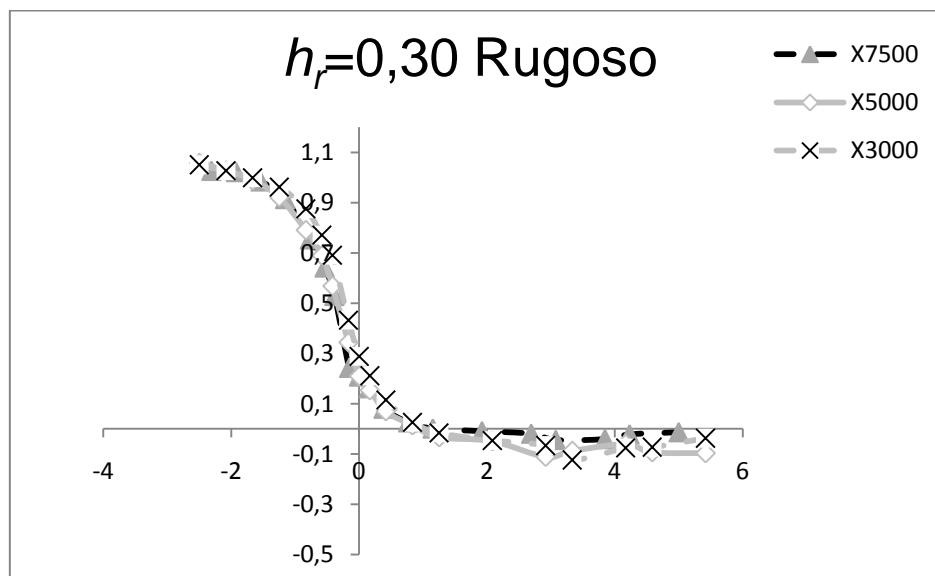


Figura 134 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,30$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)

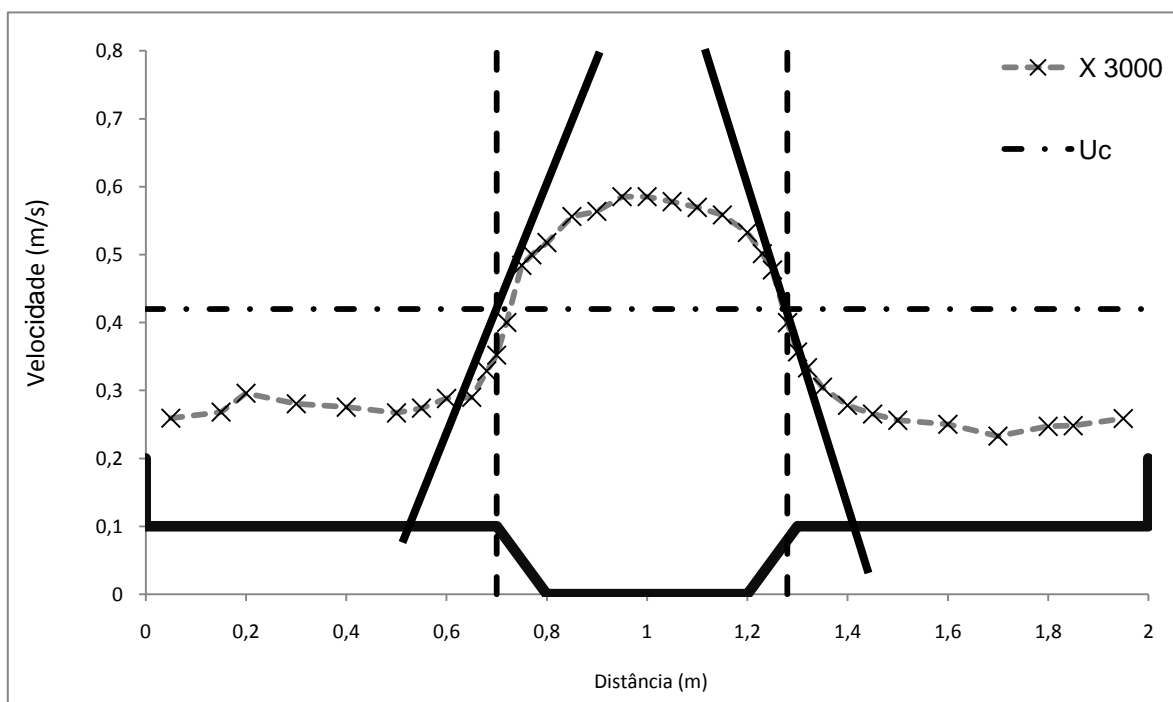
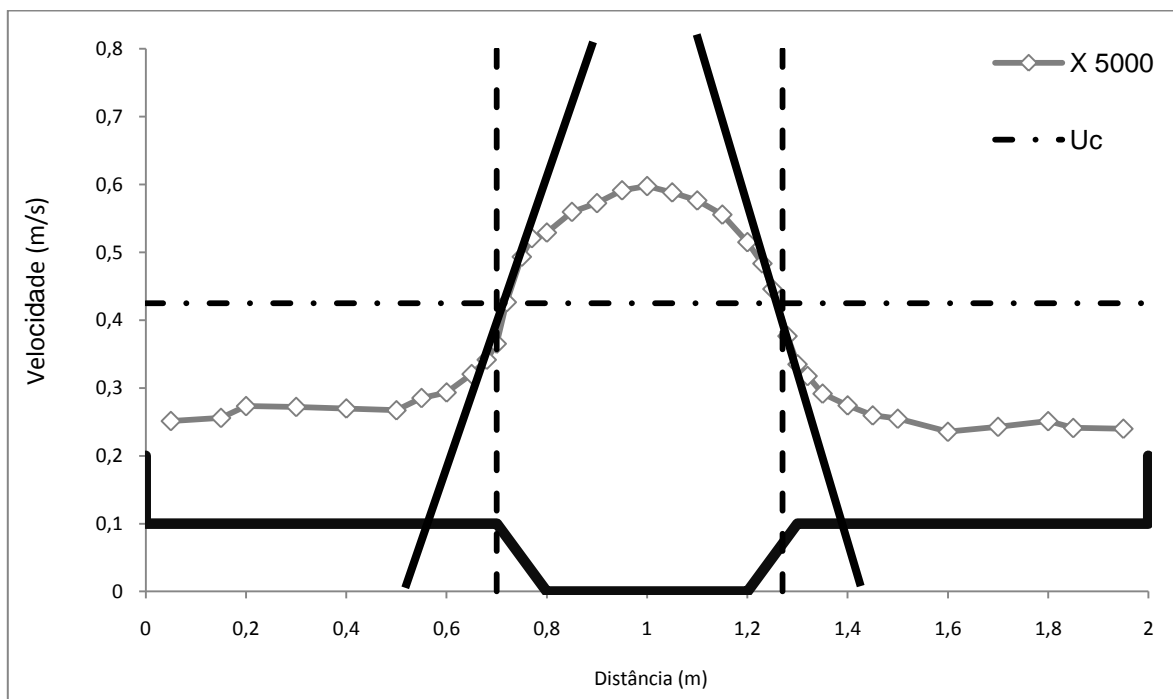
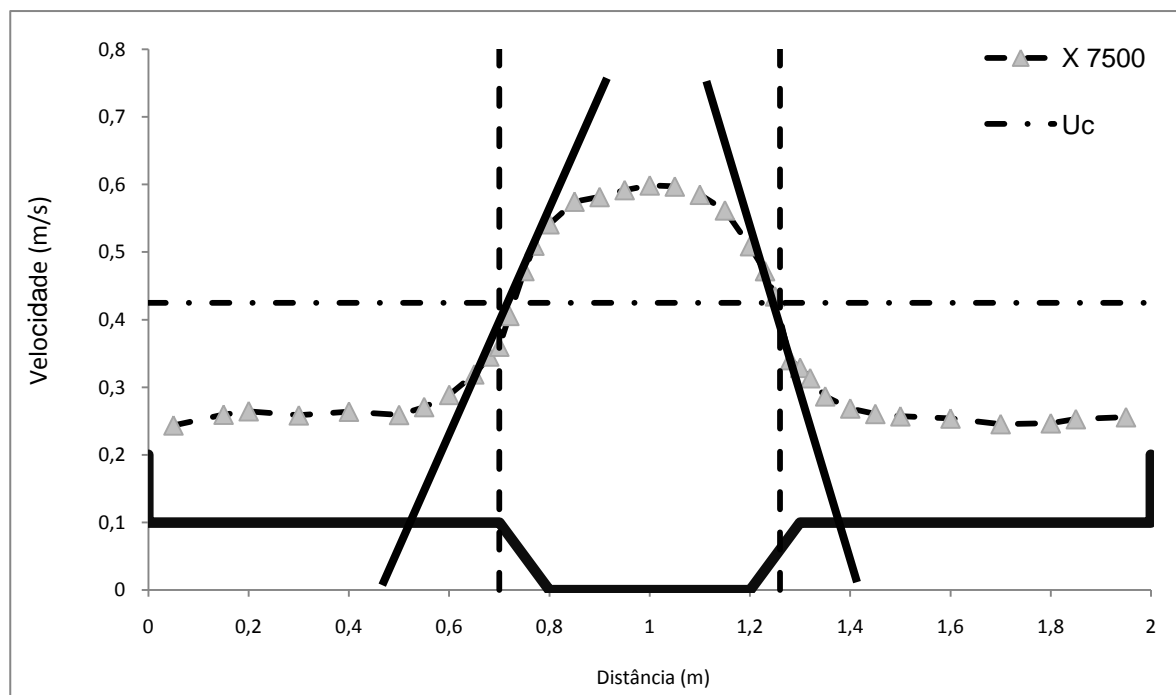


Figura 135 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)



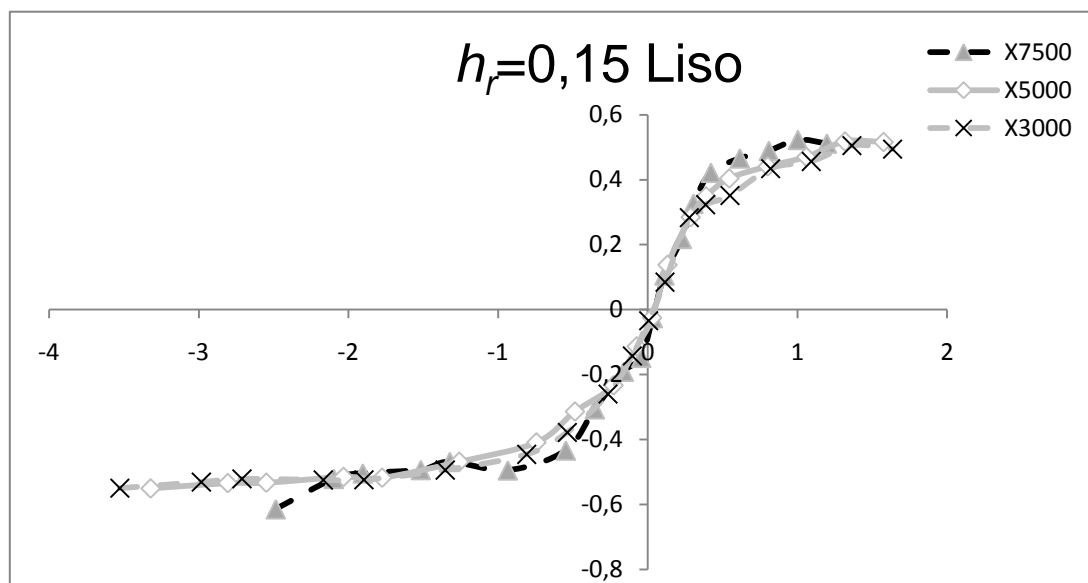
**Figura 136 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**



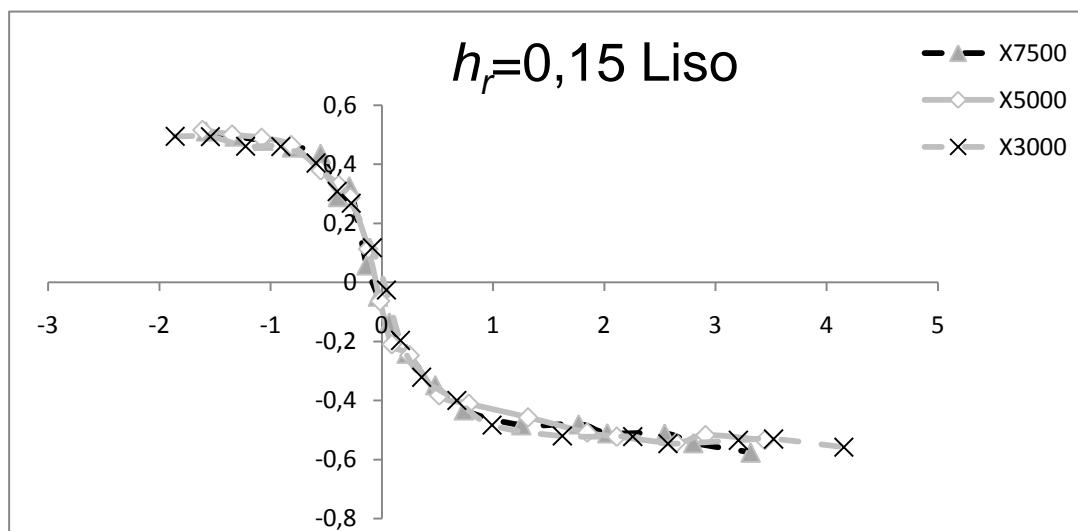
**Figura 137 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X7500 segundo metodologia de Prooijen e Uijtewaal (2002)**



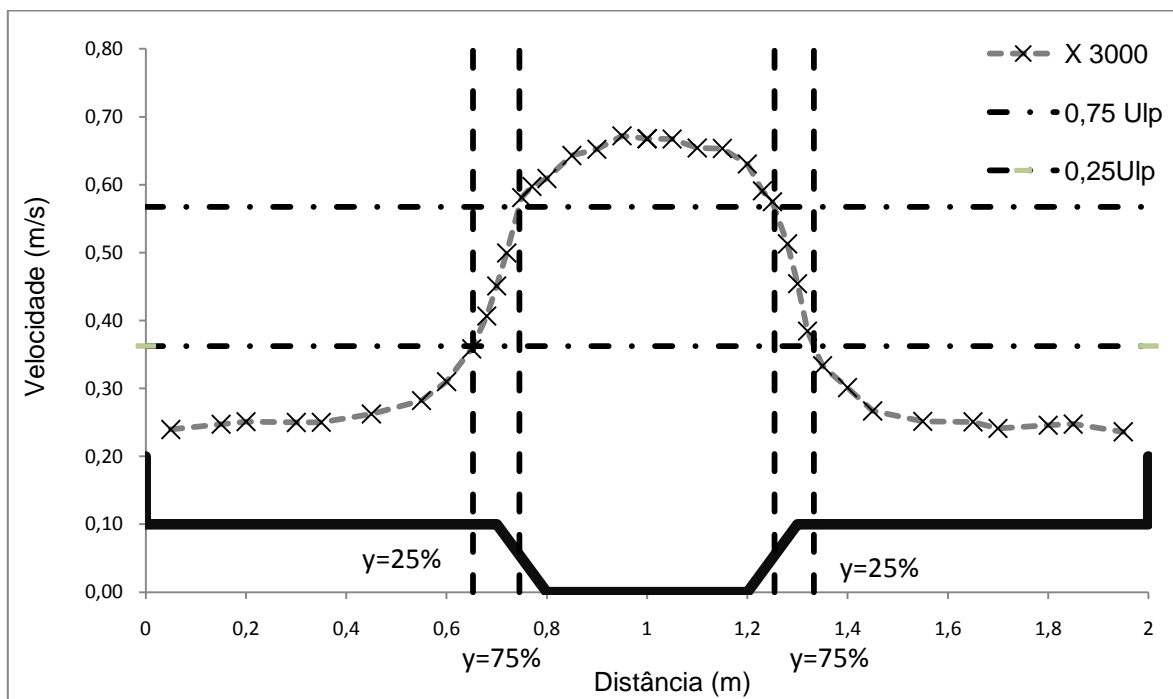
Cálculo da espessura da Camada de Mistura pela metodologia de Prooijen *et al.* (2005)



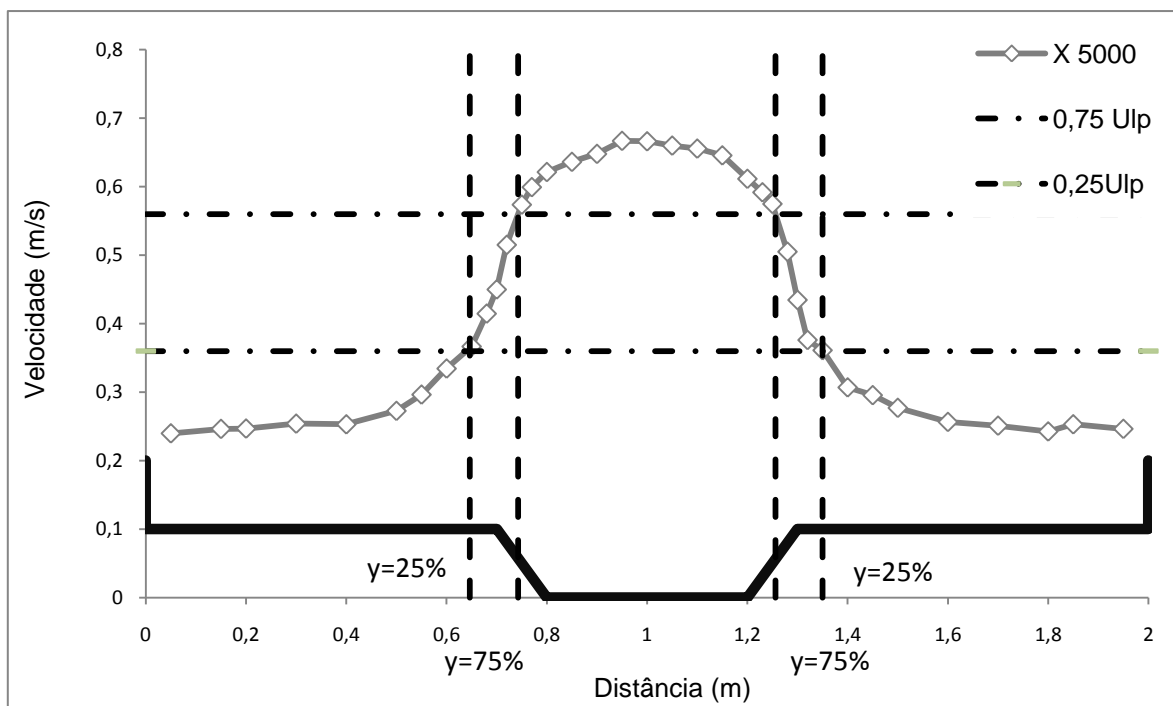
**Figura 138 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,15$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 139 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,15$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 140 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 141 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**

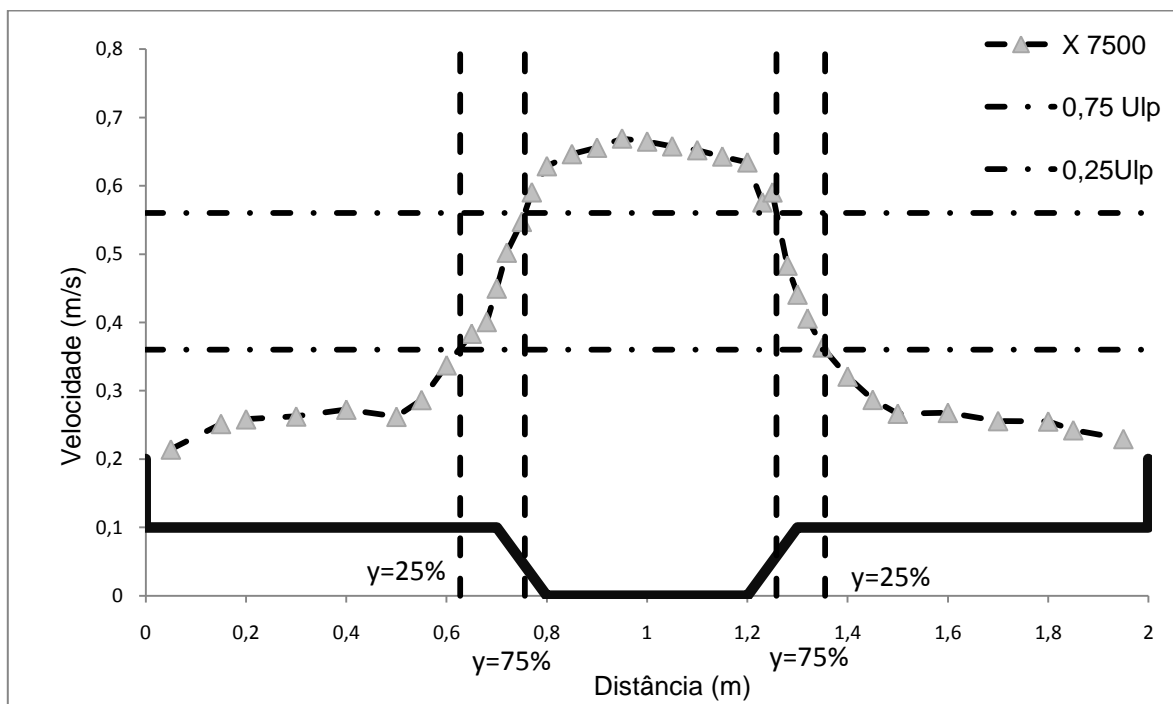


Figura 142 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,15$  em X7500 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)

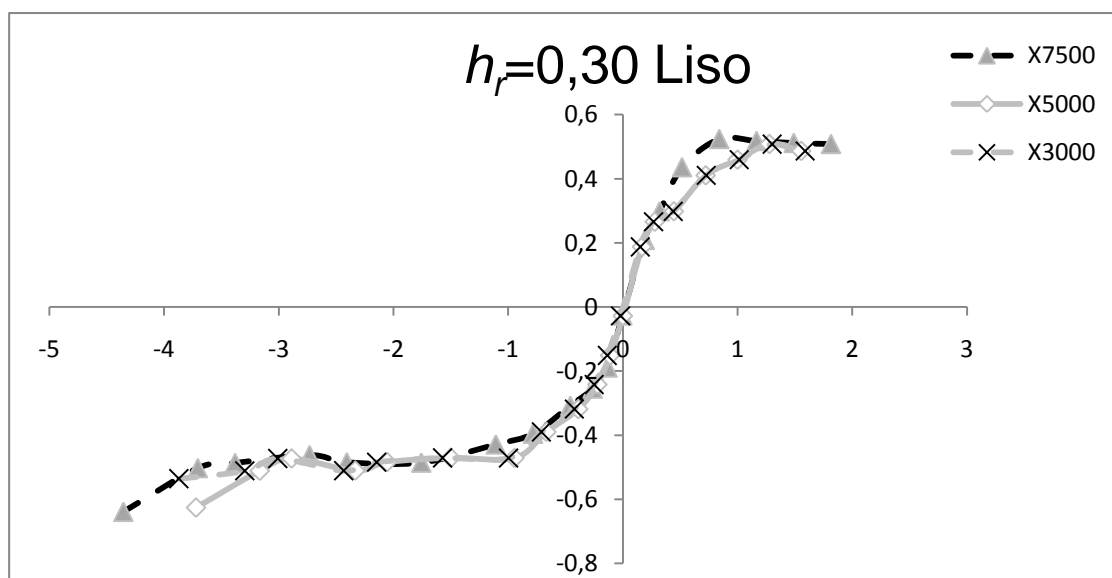


Figura 143 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)

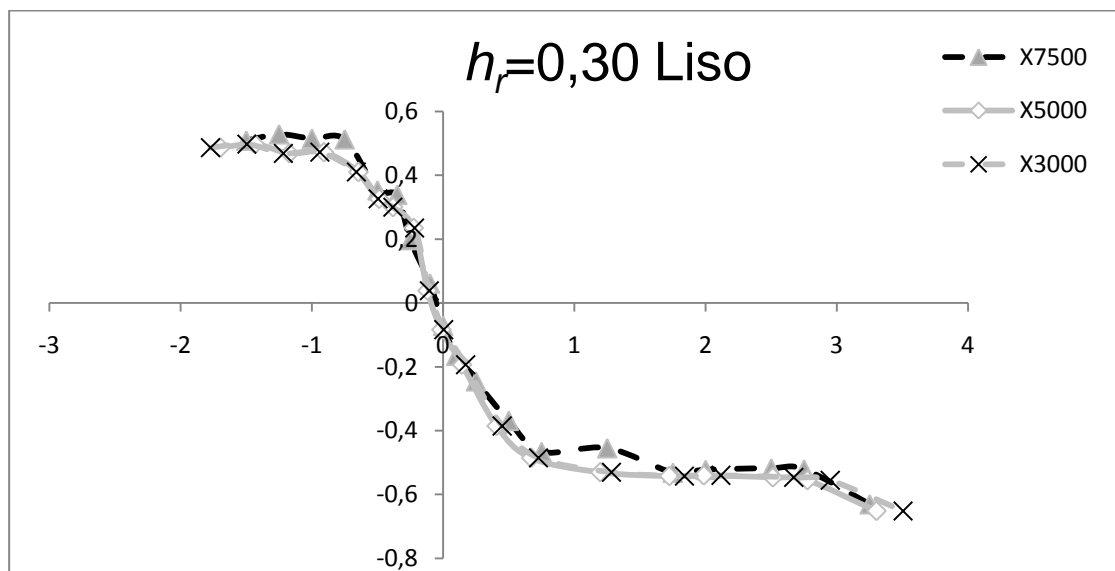


Figura 144 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Lisos -  $h_r=0,30$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)

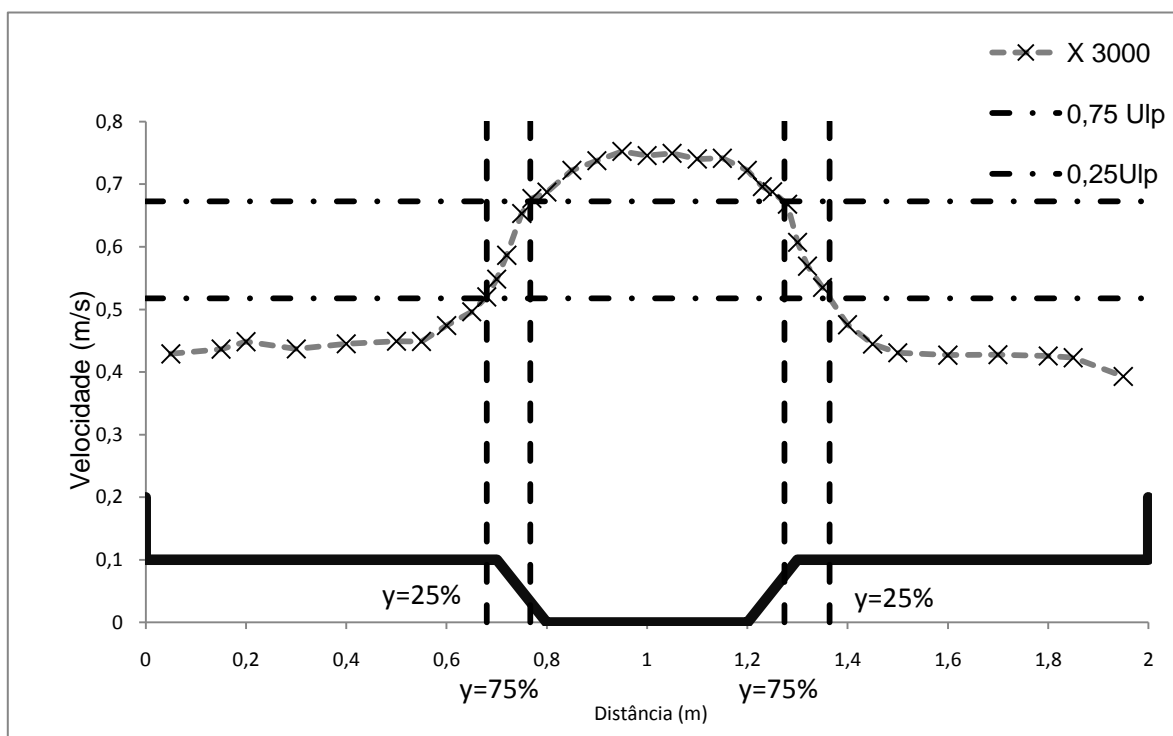
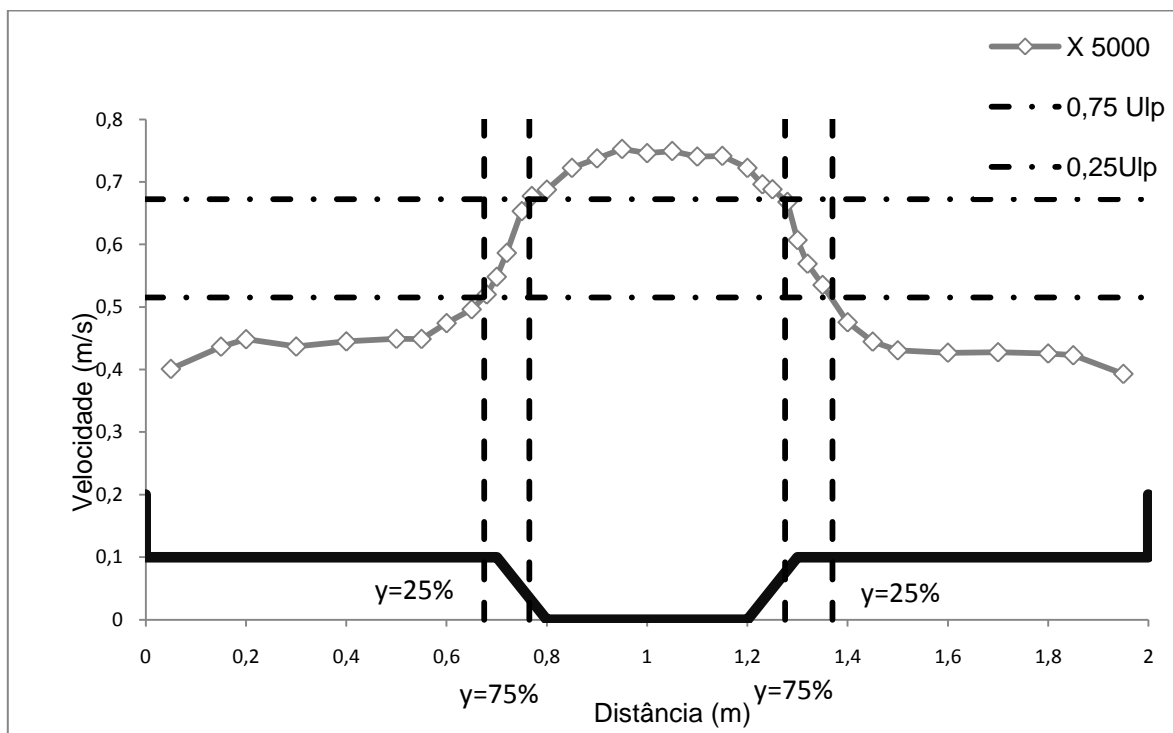
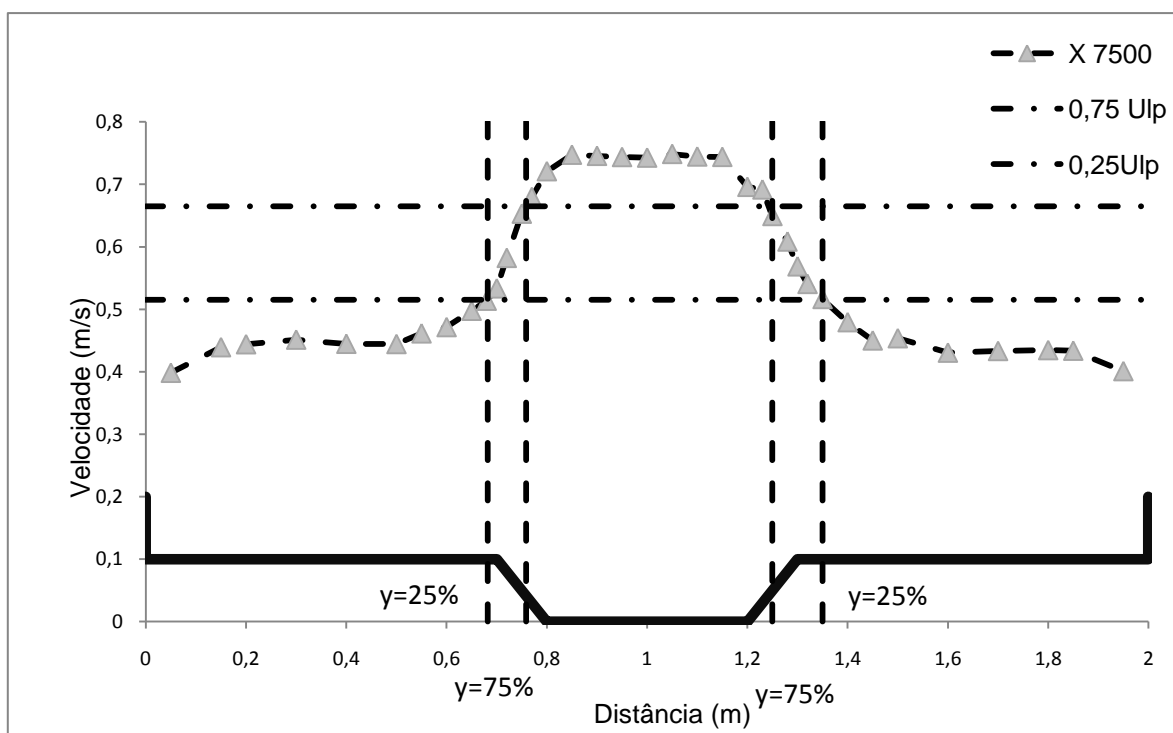


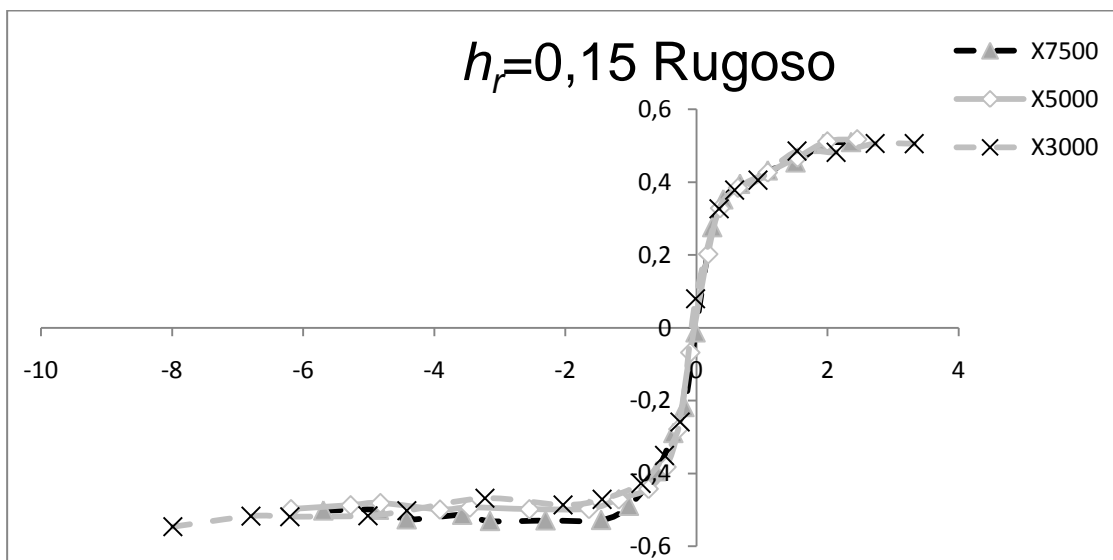
Figura 145 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)



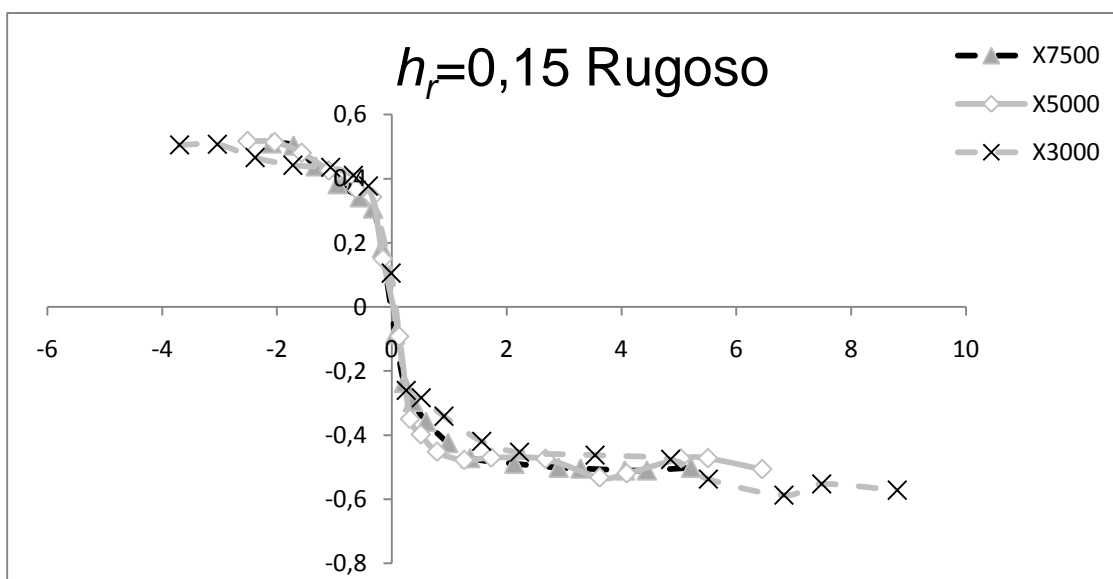
**Figura 146 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



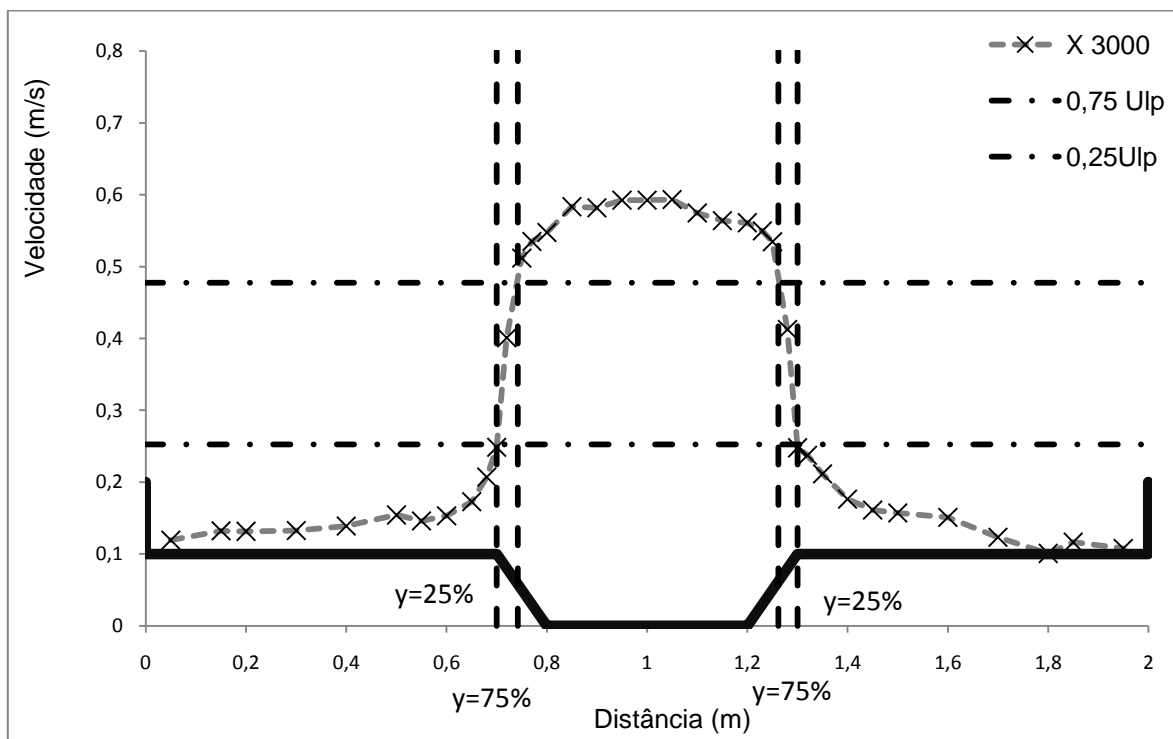
**Figura 147 - Regime uniforme com Leitos Lisos –  $h_r=0,30$  em X7500 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



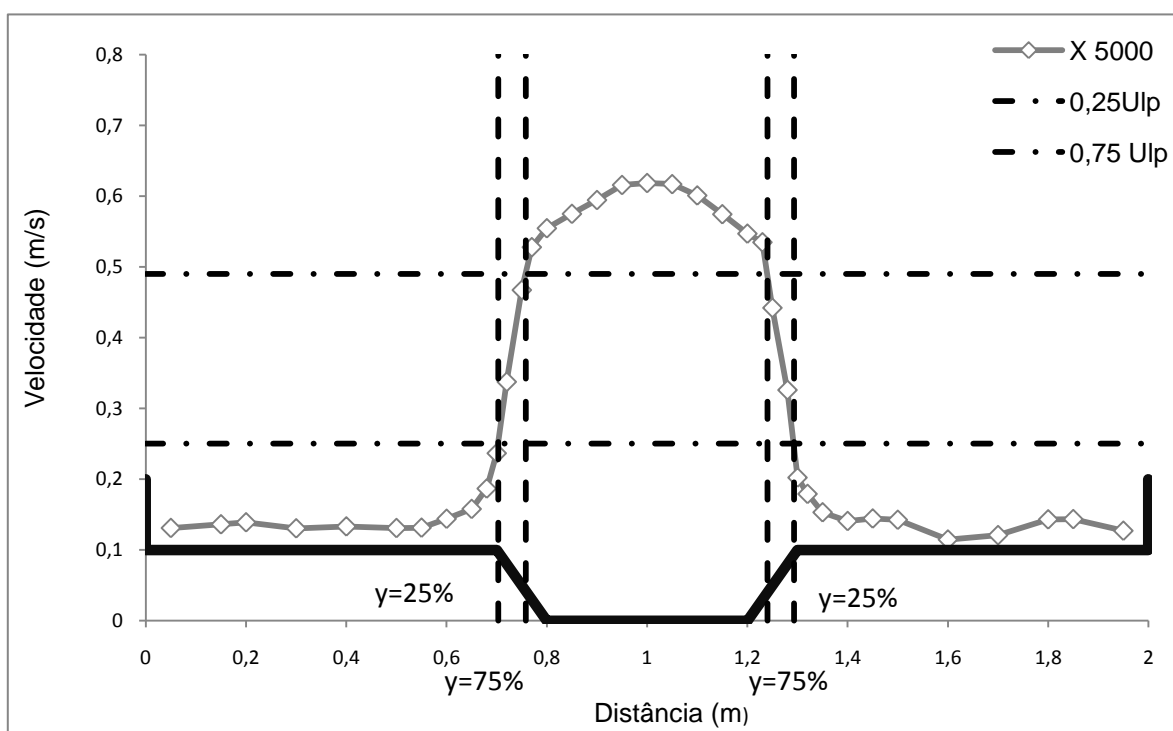
**Figura 148 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,15$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 149 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,15$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 150 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 151 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**

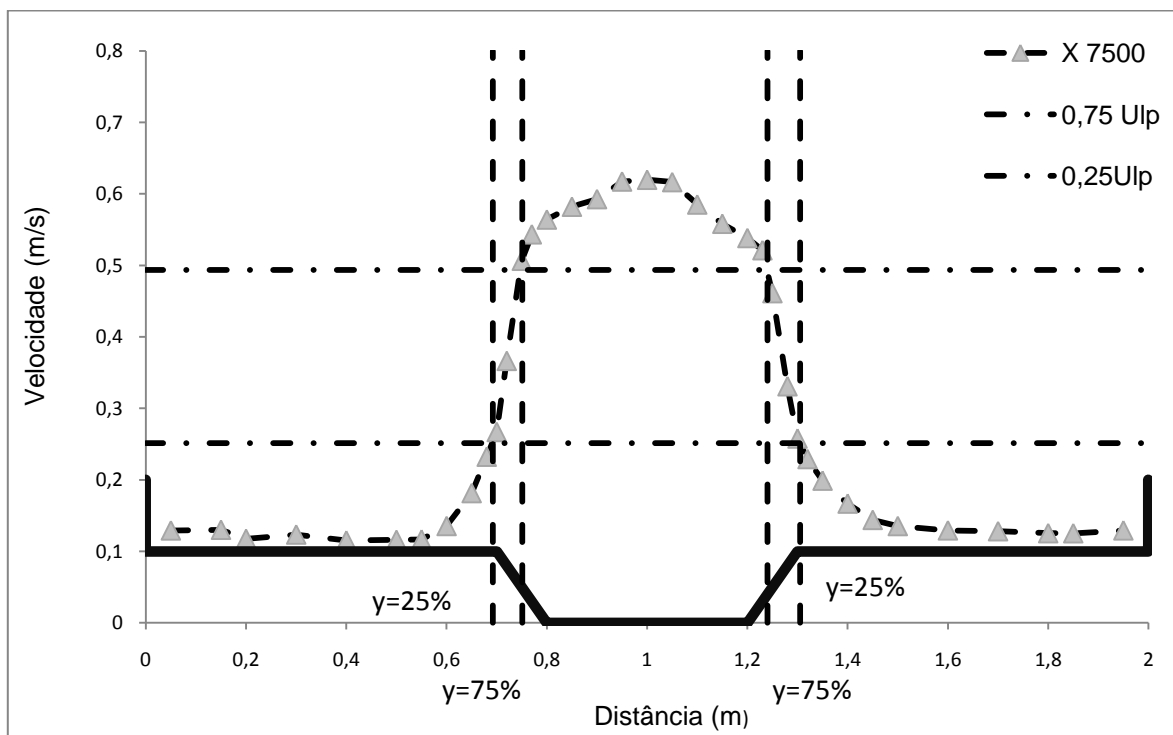


Figura 152 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,15$  em X7500 segundo metodologia de Prooijsen *et al.* (2005)

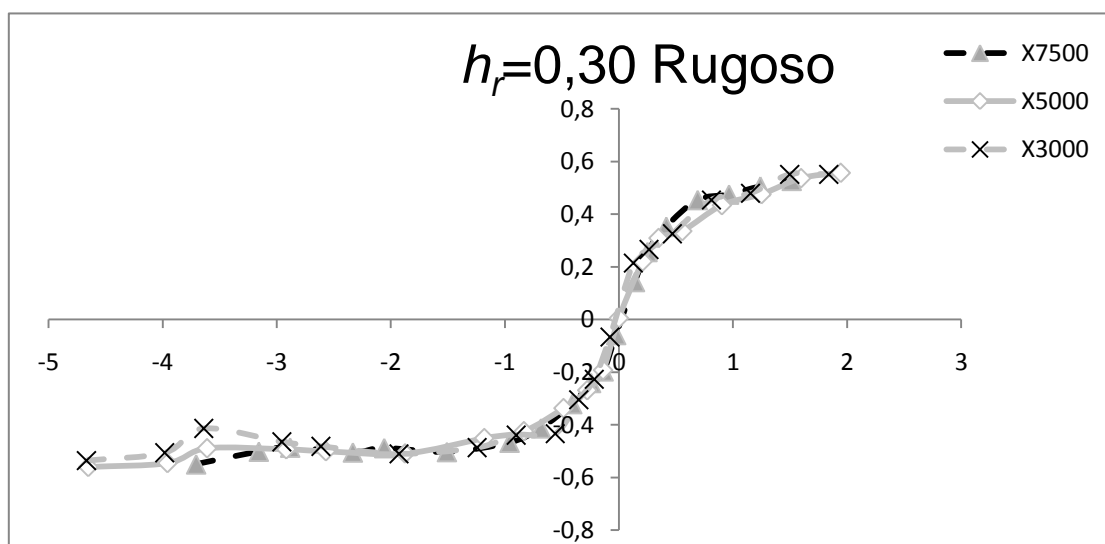
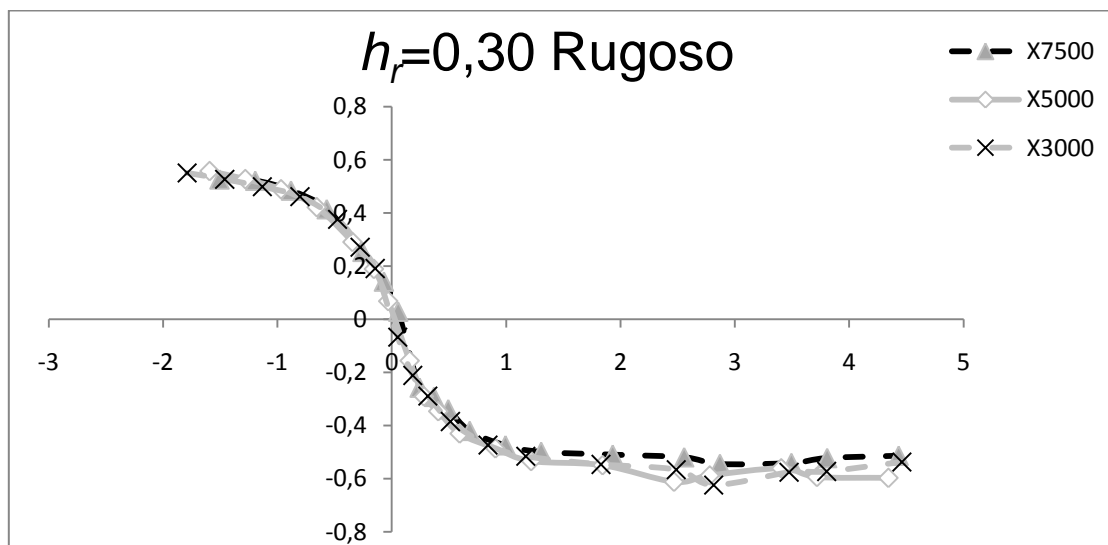
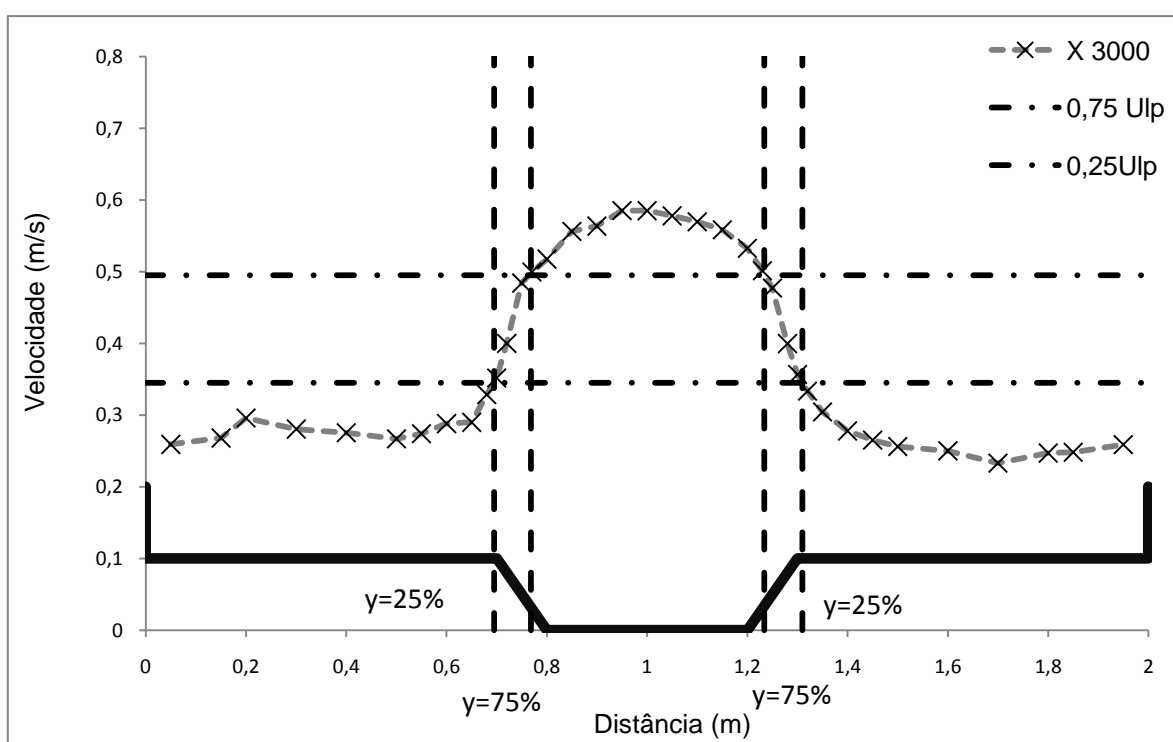


Figura 153 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos -  $h_r=0,30$  – Leito esquerdo segundo metodologia de Prooijsen *et al.* (2005)





**Figura 154 - Perfil transversal de velocidades dimensionado – RU com Leitos Rugosos  
-  $h_r=0,30$  – Leito direito segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**



**Figura 155 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X3000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)**

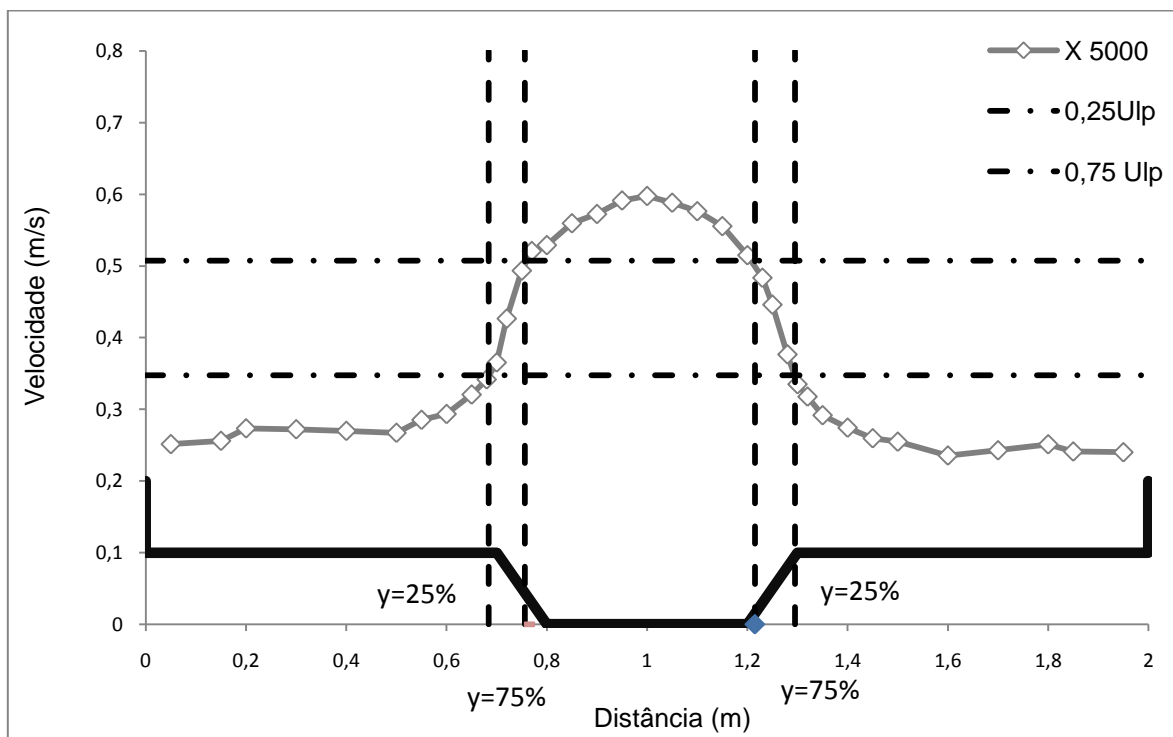


Figura 156 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X5000 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)

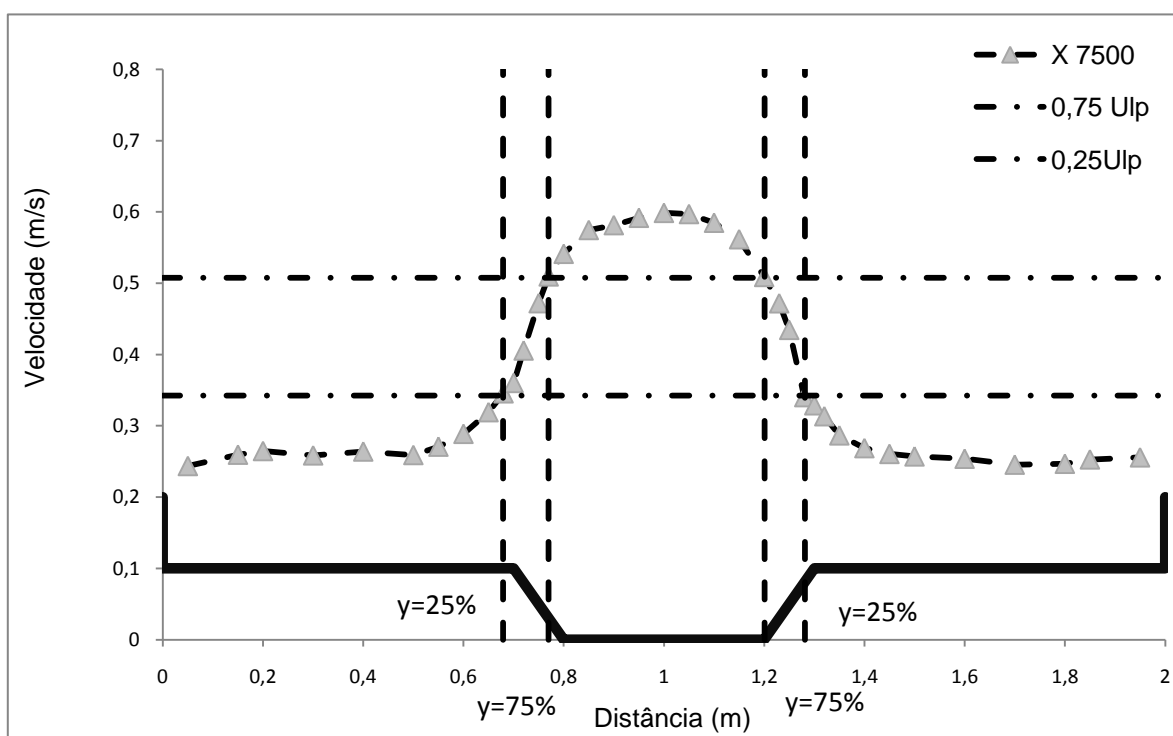


Figura 157 - Regime uniforme com Leitos Rugosos –  $h_r=0,30$  em X7500 segundo metodologia de Prooijen *et al.* (2005)

**Quadro 21 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de  $v_t$  -  $h_r=0,15$  Liso**

	$\gamma$	$Df$	$Dc$	$cf,f$	$cf,c$	$dU/dy$		
						X3000	X5000	X7500
<b>Leito de cheia esquerdo</b>	0,05	0,017		0,003		0,077	0,065	0,374
	0,15					0,078	0,028	0,215
	0,2					0,048	0,030	0,104
	0,3					-0,002	0,011	0,147
	0,35					0,043	0,052	0,099
	0,45					0,161	0,217	0,070
	0,55					0,437	0,586	0,759
	0,6					0,761	0,703	0,970
	0,65					1,366	1,241	0,703
	0,68					1,973	1,698	1,696
	0,7					2,328	2,512	2,536
<b>Leito principal esquerdo</b>	0,72		0,037		0,003	2,549	2,739	2,175
	0,75		0,067		0,003	1,580	1,550	1,898
	0,77		0,087		0,003	0,649	1,062	1,806
	0,8		0,117		0,003	0,496	0,572	0,928
	0,85		0,117		0,003	0,430	0,265	0,270
	0,9		0,117		0,003	0,290	0,307	0,228
	0,95		0,117		0,003	0,156	0,184	0,091
	1		0,117		0,003	-0,048	-0,069	-0,114
<b>Leito principal direito</b>	1,05		0,117		0,003	-0,048	-0,069	-0,114
	1,1		0,117		0,003	-0,137	-0,106	-0,127
	1,15		0,117		0,003	-0,139	-0,143	-0,149
	1,2		0,117		0,003	-0,234	-0,441	-0,178
	1,23		0,117		0,003	-0,996	-0,667	-1,283
	1,25		0,087		0,003	-1,011	-0,769	-0,341
	1,28		0,067		0,003	-1,308	-1,438	-0,990
<b>Leito de cheia direito</b>	1,3	0,017		0,003	0,003	-2,585	-3,047	-2,699
	1,32					-3,215	-3,225	-1,932
	1,35					-2,780	-1,955	-1,612
	1,4					-1,305	-0,720	-1,201
	1,45					-0,664	-0,656	-0,767
	1,55					-0,509	-0,213	-0,522
	1,65					-0,080	-0,195	-0,095
	1,7					-0,131	-0,142	-0,156
	1,8					-0,113	-0,101	-0,162
	1,85					0,039	0,112	-0,173
	1,95					-0,014	0,118	-0,214

**Quadro 22 – Distribuição transversal de  $v_t$ ,  $v'_t$  e  $v''_t$  -  $h_r=0,15$  Liso**

$y$	$v'_t(y) \cdot 10^5$			$ v''_t(y)  \cdot 10^5$			$v_t(y) \cdot 10^5$		
	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000
0,05	1,93	2,16	2,16	47,64	8,32	5,01	49,57	10,48	7,16
0,15	2,27	2,22	2,27	27,37	3,61	5,07	29,64	5,83	7,34
0,2	2,33	2,22	2,33	13,24	3,88	3,12	15,57	6,11	5,45
0,3	2,37	2,29	2,37	18,76	1,34	0,14	21,12	3,63	2,51
0,35	2,46	2,28	2,46	12,56	6,65	2,81	15,02	8,93	5,27
0,45	2,36	2,46	2,36	8,96	27,69	10,42	11,32	30,15	12,78
0,55	2,58	2,67	2,58	96,72	74,73	28,32	99,30	77,40	30,90
0,6	3,04	3,01	3,04	123,66	89,59	49,34	126,70	92,60	52,38
0,65	3,46	3,30	3,46	89,56	158,20	88,55	93,01	161,50	92,00
0,68	3,61	3,74	3,61	216,13	216,44	127,85	219,74	220,17	131,46
0,7	4,05	4,05	4,05	323,12	320,15	150,87	327,17	324,21	154,92
0,72	9,84	10,09	9,84	128,16	91,24	76,38	138,00	101,34	86,22
0,75	19,53	20,49	19,53	61,90	28,59	26,22	81,43	49,07	45,75
0,77	27,50	27,92	27,50	45,40	15,09	8,30	72,90	43,01	35,80
0,8	39,68	39,23	39,68	17,36	6,04	4,72	57,04	45,28	44,40
0,85	40,80	40,17	40,80	5,05	2,80	4,09	45,85	42,97	44,88
0,9	41,38	40,91	41,38	4,26	3,24	2,76	45,65	44,15	44,14
0,95	42,23	42,11	42,23	1,69	1,94	1,49	43,93	44,05	43,72
1	41,96	42,06	41,96	2,13	0,73	0,46	44,09	42,80	42,41
1,05	41,96	42,06	41,96	1,21	1,30	0,34	43,16	43,36	42,29
1,1	41,51	41,67	41,51	1,34	1,99	0,96	42,85	43,66	42,47
1,15	41,16	41,39	41,16	1,57	2,67	0,98	42,73	44,07	42,13
1,2	40,58	40,77	40,58	1,88	8,25	1,64	42,46	49,02	42,22
1,23	40,03	38,61	40,03	13,57	12,47	6,99	53,60	51,08	47,02
1,25	26,82	27,57	26,82	4,85	19,33	9,53	31,67	46,91	36,35
1,28	21,07	20,53	21,07	18,25	46,91	16,00	39,33	67,44	37,08
1,3	9,47	9,90	9,47	89,93	179,52	1,07	99,39	189,42	10,53
1,32	3,97	3,92	3,97	139,22	232,37	153,63	143,19	236,28	157,60
1,35	3,66	3,39	3,66	116,15	140,86	132,86	119,81	144,25	136,52
1,4	3,28	3,25	3,28	86,54	51,86	62,38	89,82	55,12	65,66
1,45	2,89	2,76	2,89	55,28	47,26	31,74	58,17	50,03	34,64
1,55	2,58	2,66	2,58	37,59	15,33	24,31	40,18	17,99	26,89
1,65	2,40	2,50	2,40	6,86	14,09	3,83	9,26	16,58	6,24
1,7	2,41	2,31	2,41	11,27	10,21	6,28	13,68	12,52	8,69
1,8	2,30	2,26	2,30	11,69	7,30	5,41	14,00	9,56	7,72
1,85	2,30	2,18	2,30	12,45	8,05	1,86	14,75	10,24	4,16
1,95	2,18	2,28	2,18	15,40	8,48	0,68	17,58	10,76	2,86

**Quadro 23 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de  $v_t$  -  $h_r=0,30$  Liso**

	$Y$	$Df$	$Dc$	$cf,f$	$cf,c$	$dU/dy$		
						X3000	X5000	X7500
<b>Leito de cheia esquerdo</b>	0,05	0,042		0,002		0,076	0,356	0,409
	0,15					0,184	0,277	0,200
	0,2					0,119	0,119	0,088
	0,3					0,071	0,071	-0,064
	0,35					0,124	0,124	-0,090
	0,45					0,020	0,020	0,083
	0,55					0,336	0,336	0,191
	0,6					0,474	0,474	0,362
	0,65					0,661	0,661	0,531
	0,68					1,162	1,162	0,806
<b>Leito principal esquerdo</b>	0,7					1,659	1,659	1,713
	0,72		0,062		0,002	2,036	2,036	2,407
	0,75		0,092		0,003	1,616	1,616	1,744
	0,77		0,112		0,003	0,860	0,860	1,351
	0,8		0,142		0,003	0,472	0,472	1,058
	0,85		0,142		0,003	0,500	0,500	0,246
	0,9		0,142		0,003	0,303	0,303	-0,037
	0,95		0,142		0,003	0,085	0,085	-0,028
<b>Leito principal direito</b>	1		0,142		0,003	-0,033	-0,033	0,049
	1,05		0,142		0,003	-0,033	-0,033	0,049
	1,1		0,142		0,003	-0,055	-0,055	0,018
	1,15		0,142		0,003	-0,078	-0,078	-0,047
	1,2		0,142		0,003	-0,181	-0,181	-0,486
	1,23		0,142		0,003	-0,689	-0,689	-0,447
	1,25		0,112		0,003	-0,589	-0,589	-1,330
	1,28		0,092		0,003	-0,510	-0,510	-1,819
<b>Leito de cheia direito</b>	1,3	0,042		0,002		-2,096	-2,096	-1,738
	1,32					-2,469	-2,469	-1,697
	1,35					-1,590	-1,590	-1,163
	1,4					-1,155	-1,155	-0,780
	1,45					-0,905	-0,905	-0,664
	1,55					-0,459	-0,459	-0,378
	1,65					-0,088	-0,088	-0,098
	1,7					-0,003	-0,003	-0,041
	1,8					0,003	0,003	0,040
	1,85					-0,044	-0,044	-0,008
	1,95					-0,136	-0,136	-0,122

**Quadro 24 – Distribuição transversal de  $v_t$ ,  $v'_t$  e  $v''_t$  -  $h_r=0,30$  Liso**

$y$	$v'_t(y)*10^5$			$ v''_t(y) *10^5$			$vt(y)*10^5$		
	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000
0,05	8,15	8,20	8,77	10,39	9,04	2,46	18,54	17,24	11,24
0,15	8,99	8,93	8,99	5,07	7,04	5,96	14,06	15,97	14,94
0,2	9,08	9,17	9,08	2,23	3,03	3,87	11,32	12,20	12,95
0,3	9,23	8,93	9,23	1,63	1,81	2,31	10,87	10,74	11,54
0,35	9,10	9,10	9,10	2,29	3,15	4,02	11,39	12,25	13,12
0,45	9,09	9,19	9,09	2,12	0,50	0,63	11,21	9,68	9,72
0,55	9,44	9,18	9,44	4,85	8,54	10,91	14,29	17,73	20,34
0,6	9,64	9,70	9,64	9,19	12,02	15,35	18,84	21,72	24,99
0,65	10,18	10,15	10,18	13,48	16,79	21,44	23,66	26,94	31,62
0,68	10,51	10,64	10,51	20,46	29,50	37,67	30,97	40,14	48,17
0,7	10,91	11,21	10,91	43,49	42,11	53,76	54,40	53,32	64,67
0,72	17,89	18,02	17,89	41,46	47,92	44,77	59,35	65,93	62,66
0,75	30,55	30,56	30,55	20,27	25,65	23,97	50,82	56,21	54,51
0,77	39,36	39,23	39,36	12,90	11,22	10,48	52,26	50,45	49,85
0,8	54,24	51,72	54,24	7,97	4,86	4,54	62,21	56,58	58,78
0,85	56,22	54,34	56,22	1,85	5,14	4,80	58,08	59,48	61,03
0,9	56,09	55,48	56,09	0,28	3,12	2,91	56,36	58,60	59,00
0,95	55,95	56,62	55,95	0,21	0,87	0,81	56,16	57,49	56,76
1	55,87	56,12	55,87	0,37	0,34	0,32	56,24	56,46	56,19
1,05	55,87	56,12	55,87	0,63	0,25	0,34	56,50	56,37	56,21
1,1	56,32	56,37	56,32	0,23	0,42	0,57	56,55	56,79	56,89
1,15	56,01	55,70	56,01	0,60	0,59	0,80	56,61	56,29	56,81
1,2	55,96	55,79	55,96	6,17	1,36	1,86	62,13	57,15	57,82
1,23	52,35	54,34	52,35	5,68	5,19	7,09	58,03	59,53	59,45
1,25	40,06	40,32	40,06	21,43	5,62	7,68	61,49	45,94	47,74
1,28	30,37	32,19	30,37	35,65	5,92	8,09	66,02	38,11	38,46
1,3	18,69	20,52	18,69	50,48	36,11	0,78	69,18	56,63	19,47
1,32	11,63	12,42	11,63	72,65	105,74	85,65	84,28	118,16	97,28
1,35	11,06	11,64	11,06	49,82	68,07	55,14	60,88	79,72	66,20
1,4	10,56	10,95	10,56	33,39	49,46	40,06	43,96	60,41	50,63
1,45	9,80	9,73	9,80	28,43	38,76	31,40	38,23	48,49	41,20
1,55	9,21	9,09	9,21	16,19	19,67	15,94	25,40	28,77	25,14
1,65	9,28	8,81	9,28	4,18	3,79	3,07	13,46	12,60	12,35
1,7	8,81	8,73	8,81	1,77	0,14	0,11	10,57	8,87	8,92
1,8	8,86	8,75	8,86	1,72	0,11	0,09	10,59	8,86	8,95
1,85	8,89	8,71	8,89	0,34	1,87	1,51	9,23	10,57	10,40
1,95	8,87	8,65	8,87	5,21	5,84	4,73	14,08	14,49	13,60

**Quadro 25 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de  $v_t$  -  $h_r=0,15$  Rugoso**

	$Y$	$Df$	$Dc$	$cf,f$	$cf,c$	$dU/dy$		
						X3000	X5000	X7500
<b>Leito de cheia esquerdo</b>	0,05	0,019		0,012		0,131	0,052	0,010
	0,15					0,034	0,055	-0,166
	0,2					-0,005	0,010	-0,149
	0,3					0,087	0,008	-0,090
	0,35					0,134	0,029	-0,108
	0,45					0,036	-0,009	0,007
	0,55					0,065	0,170	0,253
	0,6					0,267	0,265	0,649
	0,65					0,865	0,704	1,406
	0,68					1,702	1,882	1,717
	0,7					4,840	3,772	3,352
<b>Leito principal esquerdo</b>	0,72		0,039		0,010	6,047	4,758	4,852
	0,75		0,069		0,008	2,179	3,546	2,978
	0,77		0,089		0,006	0,861	2,173	1,386
	0,8		0,119		0,003	0,526	0,710	0,565
	0,85		0,119		0,003	0,344	0,399	0,285
	0,9		0,119		0,003	0,092	0,408	0,353
	0,95		0,119		0,003	0,107	0,240	0,271
	1		0,119		0,003	0,007	0,012	-0,008
<b>Leito principal direito</b>	1,05		0,119		0,003	0,007	0,012	-0,008
	1,1		0,119		0,003	-0,178	-0,176	-0,346
	1,15		0,119		0,003	-0,293	-0,425	-0,583
	1,2		0,119		0,003	-0,137	-0,540	-0,469
	1,23		0,119		0,003	-0,258	-0,460	-0,505
	1,25		0,089		0,006	-0,602	-2,943	-2,029
	1,28		0,069		0,008	-2,080	-4,328	-3,539
<b>Leito de cheia direito</b>	1,3	0,019		0,012		-6,568	-5,261	-3,931
	1,32					-4,377	-3,672	-2,547
	1,35					-0,658	-1,040	-1,265
	1,4					-0,802	-0,633	-0,870
	1,45					-0,506	-0,088	-0,550
	1,55					-0,218	0,041	-0,333
	1,65					-0,051	-0,149	-0,073
	1,7					-0,389	-0,010	-0,036
	1,8					-0,444	0,158	-0,025
	1,85					0,135	0,079	-0,010
	1,95					0,181	-0,050	0,012

**Quadro 26 – Distribuição transversal de  $v_t$ ,  $v'_t$  e  $v''_t$  -  $h_r=0,15$  Rugoso**

$y$	$v'_t(y)*10^5$			$ v''_t(y) *10^5$			$vt(y)*10^5$		
	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000
0,05	2,74	2,78	2,53	0,24	1,27	1,63	2,99	4,05	4,16
0,15	2,77	2,89	2,77	4,09	1,36	0,43	6,86	4,25	3,19
0,2	2,49	2,95	2,49	3,68	0,24	0,06	6,17	3,19	2,56
0,3	2,62	2,77	2,62	2,22	0,19	1,08	4,85	2,96	3,71
0,35	2,45	2,83	2,45	2,65	0,70	1,67	5,10	3,53	4,11
0,45	2,46	2,78	2,46	0,17	0,22	0,44	2,64	3,00	2,91
0,55	2,48	2,79	2,48	6,22	4,17	0,82	8,69	6,96	3,29
0,6	2,88	3,06	2,88	15,96	6,53	3,33	18,83	9,58	6,20
0,65	3,86	3,35	3,86	34,57	17,32	10,78	38,43	20,68	14,63
0,68	4,94	3,97	4,94	42,22	46,28	21,21	47,16	50,25	26,15
0,7	5,67	5,03	5,67	82,42	92,74	60,32	88,09	97,77	65,99
0,72	14,70	13,54	14,70	58,44	49,80	36,91	73,14	63,34	51,61
0,75	31,00	28,60	31,00	20,32	21,03	7,53	51,32	49,63	38,53
0,77	37,72	36,63	37,72	7,34	9,99	2,31	45,05	46,62	40,03
0,8	39,20	38,53	39,20	2,24	2,44	1,06	41,44	40,98	40,26
0,85	40,45	39,95	40,45	1,13	1,37	0,69	41,58	41,32	41,14
0,9	41,18	41,30	41,18	1,40	1,40	0,18	42,58	42,70	41,37
0,95	42,89	42,78	42,89	1,07	0,83	0,21	43,97	43,61	43,11
1	43,07	42,97	43,07	0,03	0,04	0,01	43,10	43,01	43,08
1,05	43,07	42,97	43,07	0,04	0,05	0,01	43,11	43,02	43,08
1,1	42,84	42,86	42,84	1,67	0,70	0,29	44,50	43,56	43,13
1,15	40,66	41,75	40,66	2,80	1,68	0,48	43,46	43,43	41,14
1,2	38,79	39,91	38,79	2,26	2,14	0,23	41,04	42,05	39,01
1,23	37,40	38,00	37,40	2,43	1,82	0,42	39,83	39,82	37,83
1,25	36,17	37,11	36,17	13,04	15,57	1,32	49,21	52,68	37,50
1,28	28,23	27,06	28,23	29,31	29,53	5,89	57,54	56,59	34,12
1,3	13,28	13,08	13,28	57,46	63,36	0,04	70,74	76,44	13,31
1,32	5,48	4,30	5,48	76,01	109,60	44,65	81,48	113,90	50,12
1,35	4,87	3,80	4,87	37,76	31,05	6,71	42,62	34,85	11,58
1,4	4,23	3,25	4,23	25,97	18,90	8,18	30,19	22,16	12,41
1,45	3,54	2,99	3,54	16,40	2,63	5,16	19,94	5,62	8,70
1,55	3,06	3,07	3,06	9,95	1,23	2,22	13,01	4,30	5,28
1,65	2,88	3,03	2,88	2,19	4,44	0,52	5,06	7,47	3,39
1,7	2,75	2,43	2,75	1,07	0,29	3,97	3,81	2,72	6,72
1,8	2,72	2,57	2,72	0,74	4,71	4,53	3,46	7,27	7,25
1,85	2,66	3,04	2,66	0,31	2,36	1,37	2,97	5,40	4,04
1,95	2,66	3,05	2,66	0,36	1,49	1,84	3,02	4,53	4,51



**Quadro 27 – Distribuição transversal dos coeficientes base da determinação de  $v_t$  -  $h_r=0,30$  Rugoso**

	$Y$	$Df$	$Dc$	$cf,f$	$cf,c$	$dU/dy$		
						X3000	X5000	X7500
<b>Leito de cheia esquerdo</b>	0,05	0,045		0,007		0,090	0,046	0,159
	0,15					0,399	0,248	0,121
	0,2					0,318	0,228	0,048
	0,3					-0,119	-0,035	0,052
	0,35					-0,096	-0,039	0,056
	0,45					-0,007	0,077	0,034
	0,55					0,213	0,169	0,279
	0,6					0,160	0,353	0,484
	0,65					0,819	0,643	0,779
	0,68					1,214	0,992	0,789
<b>Leito principal esquerdo</b>	0,7					1,786	2,123	1,502
	0,72		0,065		0,007	2,566	2,730	2,251
	0,75		0,095		0,006	1,587	1,713	2,012
	0,77		0,115		0,005	0,704	0,931	1,549
	0,8		0,145		0,004	0,662	0,401	0,911
	0,85		0,145		0,004	0,460	0,434	0,403
	0,9		0,145		0,004	0,291	0,318	0,171
	0,95		0,145		0,004	0,215	0,251	0,172
<b>Leito principal direito</b>	1		0,145		0,004	-0,072	-0,031	0,053
	1,05		0,145		0,004	-0,072	-0,031	0,053
	1,1		0,145		0,004	-0,156	-0,212	-0,138
	1,15		0,145		0,004	-0,195	-0,327	-0,354
	1,2		0,145		0,004	-0,370	-0,615	-0,760
	1,23		0,145		0,004	-0,846	-0,960	-1,167
	1,25		0,115		0,005	-1,139	-1,544	-1,612
	1,28		0,095		0,006	-1,755	-2,051	-2,378
<b>Leito de cheia direito</b>	1,3	0,045		0,007		-2,330	-2,174	-1,601
	1,32					-1,661	-1,473	-0,670
	1,35					-1,080	-0,866	-0,819
	1,4					-0,799	-0,672	-0,694
	1,45					-0,393	-0,321	-0,260
	1,55					-0,199	-0,213	-0,120
	1,65					-0,076	-0,121	-0,034
	1,7					-0,250	0,033	-0,121
	1,8					-0,183	0,125	-0,106
	1,85					0,061	-0,106	0,085
	1,95					0,049	-0,137	0,091

**Quadro 28 – Distribuição transversal de  $v_t$ ,  $v'_t$  e  $v''_t$  -  $h_r=0,30$  Rugoso**

y	$v'_t(y) \cdot 10^5$			$ v''_t(y)  \cdot 10^5$			$v_t(y) \cdot 10^5$		
	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000	X7500	X5000	X3000
0,05	9,26	9,56	9,86	5,46	1,57	1,98	14,72	11,14	11,83
0,15	9,87	9,74	9,87	4,15	8,49	8,81	14,01	18,22	18,68
0,2	10,06	10,40	10,06	1,63	7,82	7,03	11,69	18,22	17,09
0,3	9,83	10,35	9,83	1,79	1,19	2,62	11,62	11,54	12,45
0,35	10,04	10,26	10,04	1,93	1,35	2,11	11,96	11,61	12,15
0,45	9,85	10,16	9,85	1,17	2,65	0,16	11,02	12,82	10,01
0,55	10,30	10,85	10,30	9,56	5,78	4,69	19,85	16,64	14,99
0,6	10,98	11,16	10,98	16,59	12,09	3,53	27,57	23,26	14,51
0,65	12,14	12,19	12,14	26,71	22,06	18,07	38,84	34,26	30,20
0,68	13,14	13,00	13,14	27,06	34,01	26,80	40,20	47,00	39,94
0,7	13,69	13,90	13,69	51,51	72,80	39,41	65,21	86,70	53,11
0,72	21,44	22,56	21,44	53,41	40,55	39,19	74,85	63,11	60,63
0,75	34,20	35,77	34,20	32,66	17,41	16,58	66,86	53,17	50,78
0,77	42,60	43,55	42,60	20,77	7,82	6,08	63,37	51,37	48,67
0,8	52,55	51,38	52,55	9,68	2,67	4,53	62,23	54,05	57,08
0,85	55,80	54,34	55,80	4,28	2,89	3,15	60,08	57,23	58,95
0,9	56,46	55,60	56,46	1,82	2,12	1,99	58,28	57,71	58,45
0,95	57,46	57,43	57,46	1,83	1,67	1,47	59,28	59,10	58,92
1	58,13	58,04	58,13	0,56	0,21	0,49	58,69	58,24	58,62
1,05	58,13	58,04	58,13	0,43	0,33	0,53	58,56	58,37	58,66
1,1	57,97	57,13	57,97	1,14	2,26	1,16	59,11	59,39	59,13
1,15	56,78	55,98	56,78	2,90	3,48	1,44	59,69	59,46	58,23
1,2	54,54	53,95	54,54	6,25	6,53	2,74	60,79	60,49	57,28
1,23	49,40	50,01	49,40	9,59	10,20	6,28	58,99	60,21	55,68
1,25	39,45	40,43	39,45	16,70	20,70	10,65	56,15	61,14	50,09
1,28	31,49	32,33	31,49	29,82	33,29	19,86	61,31	65,62	51,35
1,3	17,98	19,91	17,98	29,36	51,58	1,19	47,34	71,49	19,18
1,32	12,50	12,74	12,50	17,76	39,04	39,73	30,26	51,78	52,23
1,35	11,92	12,09	11,92	21,71	22,96	25,83	33,63	35,05	37,75
1,4	10,90	11,10	10,90	18,39	17,80	19,12	29,28	28,90	30,02
1,45	10,22	10,44	10,22	6,90	8,51	9,39	17,11	18,95	19,61
1,55	9,91	9,88	9,91	3,18	5,64	4,75	13,08	15,51	14,66
1,65	9,77	9,69	9,77	0,90	3,20	1,81	10,67	12,89	11,58
1,7	9,65	8,96	9,65	3,22	0,87	5,99	12,87	9,83	15,64
1,8	9,33	9,23	9,33	2,82	3,32	4,37	12,15	12,56	13,71
1,85	9,38	9,55	9,38	2,26	2,81	1,46	11,64	12,36	10,84
1,95	9,61	9,17	9,61	2,41	3,64	1,17	12,02	12,81	10,78

**Quadro 29 – Cálculo da tensão aparente – Leitos de cheia lisos X7500**

	$h_r = 0,15$ liso			$h_r = 0,30$ liso		
Y	Vmédia	Tau bed	Tensão aparente	Vmédia	Tau bed	Tensão aparente
(m)	(m/s)	(Pa)	(Pa)	(m/s)	(Pa)	(Pa)
0,05	0,21	0,18	4,46	0,40	0,49	2,16
0,15	0,25	0,25		0,44	0,57	
0,2	0,26	0,25		0,44	0,58	
0,3	0,26	0,25		0,45	0,60	
0,35	0,27	0,27		0,44	0,56	
0,45	0,26	0,26		0,44	0,58	
0,55	0,29	0,28		0,46	0,60	
0,6	0,34	0,42		0,47	0,65	
0,65	0,38	0,49		0,50	0,69	
0,68	0,40	0,58		0,51	0,67	
0,7	0,45	0,67		0,53	0,78	
0,72	0,50	0,72	4,02	0,58	0,92	2,21
0,75	0,55	0,68		0,65	1,09	
0,77	0,59	0,75		0,68	1,10	
0,80	0,63	0,71		0,72	0,97	
0,85	0,65	0,75		0,75	1,14	
0,90	0,66	0,81		0,75	1,03	
0,95	0,67	0,83		0,74	1,10	
1,00	0,66	0,81		0,74	0,99	
1,05	0,66	0,74		0,75	1,09	
1,10	0,65	0,75		0,74	1,03	
1,15	0,64	0,73		0,74	0,95	
1,20	0,63	0,71		0,70	0,81	
1,23	0,58	0,73		0,69	1,20	
1,25	0,59	0,82		0,65	1,13	
1,28	0,48	0,67	0,61	0,99		
1,30	0,44	0,64	3,58	0,57	0,97	2,27
1,32	0,41	0,53		0,54	0,80	
1,35	0,36	0,41		0,52	0,77	
1,40	0,32	0,30		0,48	0,66	
1,45	0,29	0,27		0,45	0,61	
1,55	0,27	0,23		0,45	0,54	
1,65	0,27	0,28		0,43	0,54	
1,70	0,26	0,24		0,43	0,55	
1,80	0,26	0,24		0,43	0,56	
1,85	0,24	0,22		0,43	0,59	
1,95	0,23	0,20	0,40	0,53		
		Tensão aparente	4,02		Tensão aparente	2,21

**Quadro 30 – Cálculo da tensão aparente – Leitos de cheia Rugosos X7500**

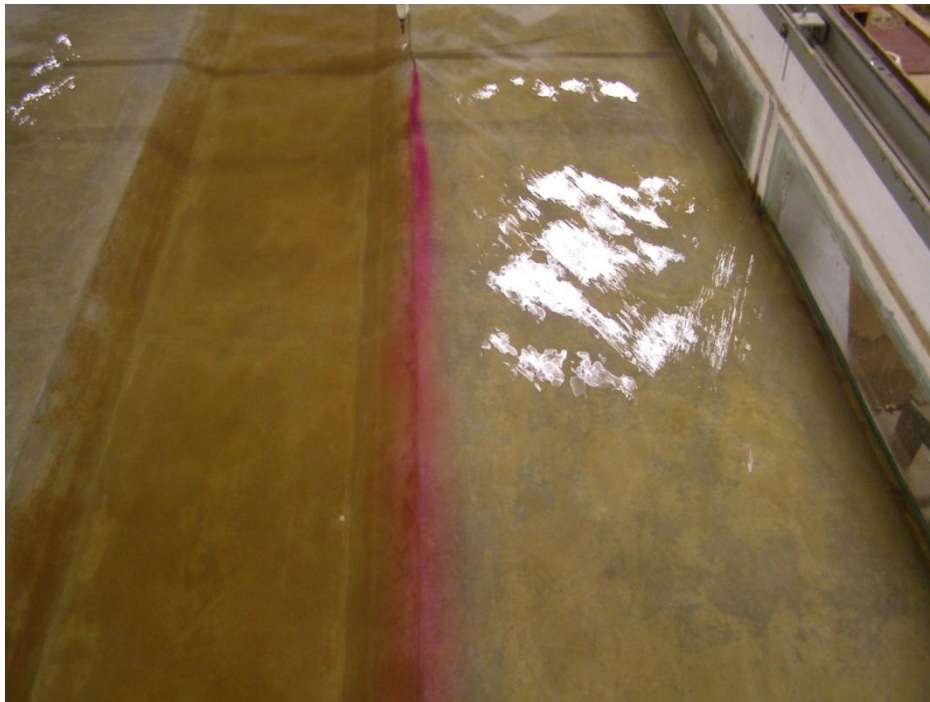
	$h_r = 0,15$ Rugoso			$h_r = 0,30$ Rugoso		
Y	Vmédia	Tau bed	Tensão aparente	Vmédia	Tau bed	Tensão aparente
(m)	(m/s)	(Pa)	(Pa)	(m/s)	(Pa)	(Pa)
0,05	0,13	0,19	6,18	0,24	0,64	4,35
0,15	0,13	0,24		0,26	0,59	
0,2	0,12	0,26		0,26	0,62	
0,3	0,12	0,28		0,26	0,59	
0,35	0,12	0,30		0,26	0,64	
0,45	0,12	0,33		0,26	0,81	
0,55	0,12	0,34		0,27	0,90	
0,6	0,14	0,56		0,29	1,02	
0,65	0,18	0,90		0,32	1,20	
0,68	0,23	1,12		0,35	1,34	
0,7	0,27	1,45		0,36	1,91	
0,72	0,37	0,52	5,48	0,41	0,54	4,57
0,75	0,51	0,70		0,47	0,67	
0,77	0,54	0,68		0,51	0,70	
0,80	0,56	0,63		0,54	0,63	
0,85	0,58	0,69		0,57	0,77	
0,90	0,59	0,69		0,58	0,73	
0,95	0,62	0,80		0,59	0,78	
1,00	0,62	0,76		0,60	0,82	
1,05	0,62	0,77		0,60	0,79	
1,10	0,59	0,68		0,58	0,72	
1,15	0,56	0,65		0,56	0,68	
1,20	0,54	0,56		0,51	0,61	
1,23	0,52	0,75		0,47	0,69	
1,25	0,46	0,72		0,43	0,67	
1,28	0,33	0,51		0,34	0,45	
1,30	0,26	1,48	6,08	0,33	1,84	4,17
1,32	0,23	1,00		0,31	1,33	
1,35	0,20	0,74		0,29	0,99	
1,40	0,17	0,49		0,27	0,94	
1,45	0,14	0,41		0,26	0,89	
1,55	0,14	0,30		0,26	0,74	
1,65	0,13	0,30		0,25	0,65	
1,70	0,13	0,31		0,25	0,57	
1,80	0,13	0,29		0,25	0,66	
1,85	0,13	0,26		0,25	0,65	
1,95	0,13	0,21		0,26	0,68	
		Tensão aparente	5,91		Tensão aparente	4,37



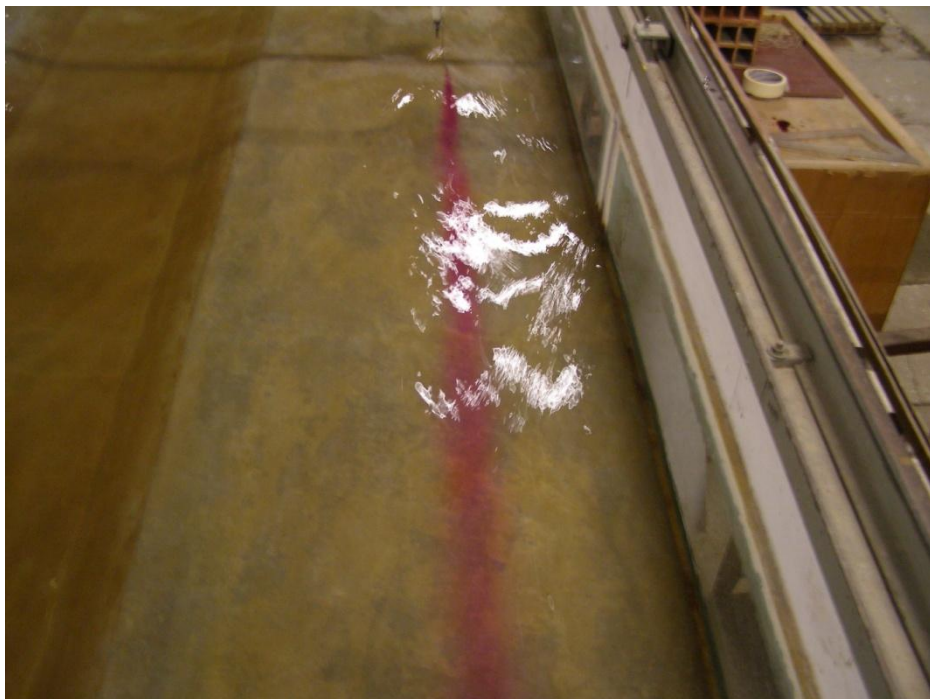
**Figura 158 - Injeção de corante no LC –  $h_f=0,20$  com LC lisos**



**Figura 159 - Injeção de corante na interface –  $h_f=0,20$  com LC lisos**



**Figura 160 - Insetção de corante na interface –  $h_r=0,30$  com LC lisos**

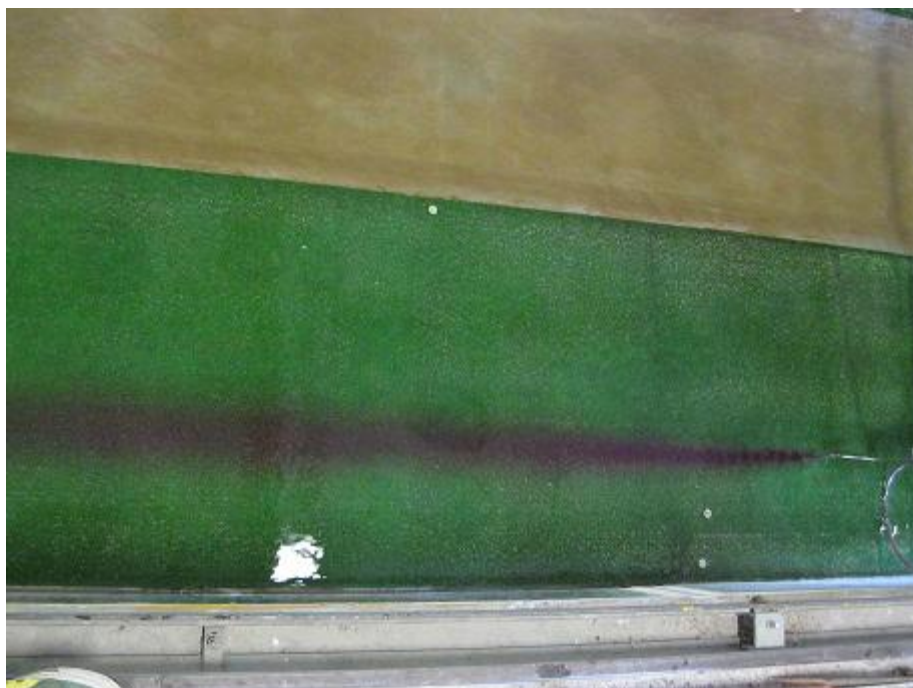


**Figura 161 - Insetção de corante no LC –  $h_r=0,30$  com LC lisos**

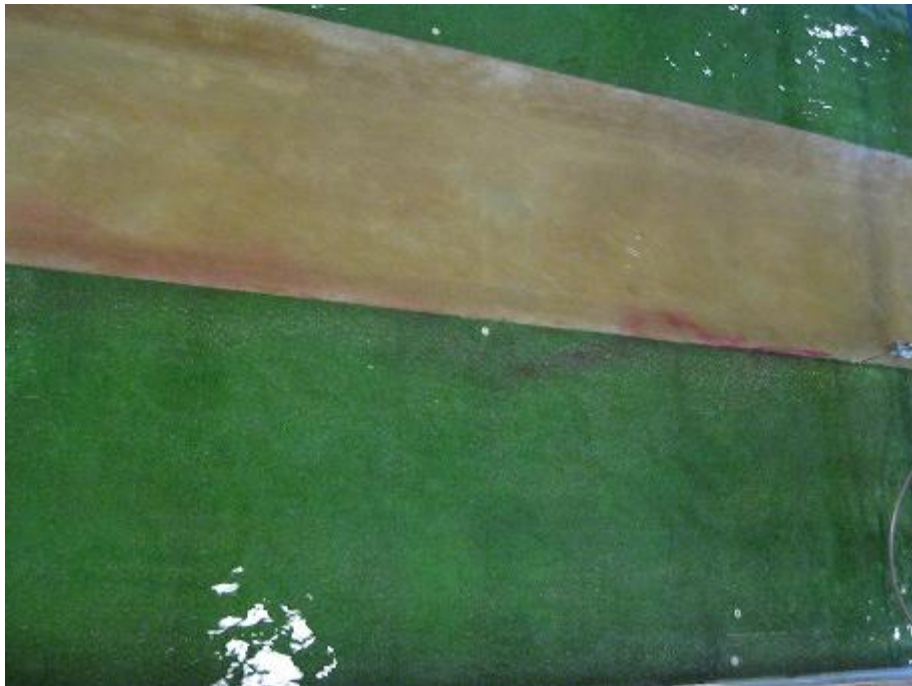




**Figura 162 - Inserção de corante na interface –  $h_r=0,15$  com LC Rugosos**



**Figura 163 - Inserção de corante no LC –  $h_r=0,15$  com LC Rugosos**



**Figura 164 - Inseto de corante na interface –  $h_r=0,30$  com LC Rugosos**



**Figura 165 - Inseto de corante no LC –  $h_r=0,30$  com LC Rugosos**